

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Aplikace metod kapilárních zkoušek
nedestruktivního testování

Application of Capillary Testing Methods
of Non-Destructive Testing

Student:

Vít Kostecký

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D.

Zadání bakalářské práce

Student: **Vít Kostecký**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R023 Technická diagnostika, opravy a udržování
Téma: **Aplikace metod kapilárních zkoušek nedestruktivního testování**
Application of Capillary Testing Methods of Non-Destructive Testing
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci bakalářské práce se zabývejte možnostmi použití metod nedestruktivního testování při kontrole povrchových necelistvostí a vad. Zvolte vhodné nástroje a postupy pro nedestruktivní testování, zvláště pak kapilární metody.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte konkrétní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

VĚCHET, M. a kol.: *Defektoskopie v otázkách a odpovědích* SNTL Praha 1989, 1. vydání, 323 s., ISBN 80-03-00100-5.

ČSN EN 15617 (051185) *Nedestruktivní zkoušení svarů*.

KOPEC, B., ŠMÍD, R.: *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: Nauka o materiálu IV*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.

KREIDL, M.: *Senzory neelektrických veličin: Technická diagnostika*. 1.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 406 s. ISBN 80-7300-158-6.

ULLMANN, J.: *Nedestruktivní zkoušení materiálů: všeobecné znalosti*. 1.vyd. Ostrava: PTS Josef Solnař, 1995. 43 s.

BLATA, J. – Juraszek, J. *Metody technické diagnostiky, teorie a praxe. Metody diagnostyki technicznej*,

teoria i praktika. Ostrava: REPRONIS, s.r.o., 2013, 133 stran, ISBN 978-80-248-2997-5

FS_SME_05_003 verze: G *Zásady pro vypracování diplomové (bakalářské) práce*.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. května 2018


Vít Kostecký

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2018


Vít Kostecký

Jméno a příjmení autora práce: Vít Kostecký

Adresa trvalého pobytu autora práce: Herodova 4, Ostrava, 702 00

Anotace bakalářské práce

KOSTECKÝ, Vít. *Aplikace metod kapilárních zkoušek nedestruktivního testování*. Ostrava, 2018, 53 s. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování. Vedoucí práce Blata, Jan.

Bakalářská práce se zabývá kapilárními metodami nedestruktivního testování. Úvodní rešerše je věnována teoretickým základům metod, informacím o zkušebních prostředcích a poznatkům pro jejich aplikaci. V rámci teorie jsou také zmíněny typy odhalitelných indikací a normy zabývající se kapilárním zkoušením. V praktické části práce je provedeno zkoušení vybraných součástí předem zvoleným postupem. Výsledkem zkoušek je vyhodnocení stavu součástí podle předepsaných výrobních norem.

Annotation of bachelor thesis

KOSTECKÝ, Vít. *Application of Capillary Testing Methods of Non-Destructive Testing*. Ostrava, 2018, 53 p. Bachelor Thesis. VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design. Thesis head Blata, Jan.

This bachelor thesis is dealing with the capillary testing methods of non-destructive testing. The initial research component is in the evaluation of method's theoretical base, providing information about the testing devices, and eventually discussing about the knowledge needed for their application. The theoretical part includes a section where the types of possibly detected indications are mentioned, alongside with the standards dealing with capillary testing. The practical part of this bachelor's thesis contains testing of the selected parts, while using a preselected technique. The output of this testing is an evaluation of the conditions of tested parts according to the prescribed product standards.

Obsah

Seznam použitých zkratk, značek a symbolů	9 -
Úvod	10 -
1 Teoretická podstata kapilární metody	11 -
1.1 Povrchové napětí	11 -
1.2 Kontaktní úhel a smáčivost	12 -
1.3 Kapilární tlak	14 -
1.4 Kapilární elevace, kapilární deprese	15 -
1.5 Viskozita	16 -
1.6 Souhra všech fyzikálních činitelů	16 -
2 Použití a použitelnost metody	17 -
2.1 Rozdělení kapilárních metod	18 -
3 Kapilární prostředky	19 -
3.1 Penetranty	19 -
3.1.1 Vlastnosti penetrantů	20 -
3.2 Emulgátor	21 -
3.3 Vývojka	22 -
3.3.1 Vlastnosti vývojek	23 -
3.4 Čističe, odmašťovače	23 -
3.5 Klasifikace zkušebních prostředků	24 -
4 Postup kapilárního zkoušení	25 -
4.1 Příprava a předčištění zkoušeného povrchu	26 -
4.2 Aplikace penetrantu	27 -
4.3 Mezičištění	28 -
4.4 Aplikace vývojk	29 -
4.5 Vyvolávání, inspekce povrchu	30 -
4.6 Zápis a vyhodnocení indikací	31 -
4.7 Konečné čištění	32 -
4.8 Zkoušení při abnormálních teplotách	32 -
5 Zařízení pro kapilární zkoušky	34 -
6 Vzhled indikací a citlivost kapilárních metod	35 -
6.1 Vzhled indikací	35 -
6.2 Citlivost kapilárních metod	36 -
7 Přehled norem vztahujících se ke kapilárnímu zkoušení	38 -
8 Aplikace teoretických znalostí v praxi	39 -
8.1 Stanovení cíle práce a navrhovaný postup řešení	39 -
8.2 Postup zkoušení	39 -

8.3	Zkoušení přírubového ozubeného kola (výrobkový sektor wp).....	- 41 -
8.4	Zkoušení koutového svaru (výrobkový sektor w).....	- 44 -
8.5	Zkoušení výřezu čepu (výrobkový sektor f)	- 47 -
8.6	Vyhodnocení provedených zkoušek	- 49 -
9	Závěr	- 51 -
	Použitá literatura	- 52 -
	Seznam ilustrací a tabulek	- 53 -
	Seznam příloh	- 53 -

Seznam použitých zkratk, značek a symbolů

Označení	Význam	
f	výrobkový sektor výkovků dle ČSN EN ISO 9712:2013	
PT	zkoušení kapilární metodou (z angl. penetrant testing)	
UV	elektromagnetické záření s vlnovou délkou mezi rentgenovým zářením a viditelnou částí spektra (z angl. ultraviolet = ultrafialové)	
UV-A	část rozsahu spektra UV záření o vlnové délce zhruba 315 až 380 nm	
w	výrobkový sektor svařovaných výrobků dle ČSN EN ISO 9712:2013	
wp	výrobkový sektor ostatních tvářených výrobků dle ČSN EN ISO 9712:2013	

Označení	Význam	Jednotka
b	šířka necelistvosti	[m]
F	povrchová síla	[N]
g	tíhové (gravitační) zrychlení	[m·s ⁻²]
h	výška hladiny kapaliny, nebo rozdíl těchto výšek	[m]
l	délka okraje povrchové blány	[m]
p_h	hydrostatický tlak	[Pa]
p_k	kapilární tlak	[Pa]
R	poloměr zakřivení povrchu kapaliny	[m]
r	poloměr kapiláry	[m]
t_e	emulgační čas	[min]
t_p	penetrační čas	[min]
t_v	vyvíjecí (vyvolávací) čas	[min]
η	dynamická viskozita	[Pa·s]
θ	kontaktní (krajový) úhel	[°]
ν	kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
ρ	hustota kapaliny	[kg·m ⁻³]
σ	povrchové napětí	[N·m ⁻¹]
σ_{lg}	mezipovrchové napětí mezi kapalinou a plynem	[N·m ⁻¹]
σ_{sg}	mezipovrchové napětí mezi pevnou látkou a plynem	[N·m ⁻¹]
σ_{sl}	mezipovrchové napětí mezi pevnou látkou a kapalinou	[N·m ⁻¹]

Úvod

Kapilární metody patří v rámci nedestruktivní diagnostiky k jednomu z nejstarších používaných metod. A přestože nedestruktivní zkoušení prošlo v čase značným vývojem, zaujímají kapilární metody mezi ostatními stále významné místo. I proto je jim věnována tato bakalářská práce.

Cílem bakalářské práce je shrnutí informací o kapilárním zkoušení a získání potřebných znalostí a dovedností pro samostatné zvládnutí provedení zkoušek na vybraných součástech, včetně vyhodnocení zkoušek.

Při vzniku této práce jsem spolupracoval s firmou PTS Josef Solnař, s. r. o., která se věnuje nedestruktivnímu zkoušení již řadu let. V ostravském sídle firmy jsem se zúčastnil pětidenního školení v oblasti PT metody, v jehož rámci jsem měl možnost použít tamní zkušební laboratoř pro provedení zkoušek vybraných součástí.

Dá se říci, že absolvováním školení a provedením samostatných zkoušek jsem získal dostatečnou teoretickou přípravu pro zvládnutí certifikace v oblasti PT zkoušení na stupni 2 (samostatný pracovník) dle ČSN ISO 9712. Nesnažil jsem se ale certifikaci získat, protože o ni momentálně nemám zájem, a navíc nesplňuji požadavek minimální délky průmyslové praxe.

Bakalářská práce se zabývá současným stavem v oblasti kapilárního zkoušení, proto bych rád alespoň stručně, vycházející z [1] a [2], zmínil historii kapilárních metod. Jejich využívání započalo ve druhé polovině 19. století, avšak objevitelé nejsou známi. Kapilární zkoušení bylo využíváno pro zkoušení železničních součástí, odlitků či těsnosti spojů. Petrolejová zkouška, jak se metoda označovala, využívala petroleje a tzv. vápenného mléka, což je suspenze hydroxidu vápenatého ve vodě.

Nedestruktivní metody se dále rozvíjely, a proto nastal útlum v používání metod kapilárních, neboť byly u magnetických materiálů nahrazeny metodou magnetickou práškovou. Další rozvoj kapilárních metod ale nastal v období druhé světové války, když bylo třeba zkoušet výrobky z lehkých (nemagnetických) kovů pro letecký průmysl. U zrodu moderního kapilárního zkoušení tak stály nezávisle na sobě firmy Brent Chemicals (Anglie), Magnaflux (USA) a Klumpf (Německo).

Od té doby jsou postupně zlepšovány vlastnosti zkušebních prostředků, nicméně žádná převratná změna v metodě jako takové nenastala.

1 Teoretická podstata kapilární metody

Kapilární metoda, jak již název naznačuje, využívá kapilárních vlastností tekutin k nalezení necelistvostí povrchu zkoušené plochy. Pro lepší představu uvádím nejprve obecné schéma zkoušky.

Na předem připravený zkoušený povrch je nanесena kapalina vhodných vlastností (penetrant), která zateče do necelistvostí. Poté je přebytek penetrantu z povrchu odstraněn a na povrch nanесena látka jiná, která pomůže penetrantu z necelistvostí zpět na povrch a sama pomocí kontrastu dopomůže k odhalení vad. Této látce se říká vývojka. Na zkoušeném povrchu, respektive na vývojce, jsou poté pozorovány a vizuálně vyhodnoceny indikace.

Z čistě teoretického pohledu by nyní stačilo říct, že citlivost zkoušky nejvíce ovlivňuje penetrant a že jeho kvalitu nejlépe popisuje smáčivost a vzlínavost. Pak by stačilo odkázat každého na literaturu fyziky pro střední školy. Protože však jde o vysvětlení podstaty metody celkově, uvedu a popíšu kapilární vlastnosti kapalin obecně. K těm patří:

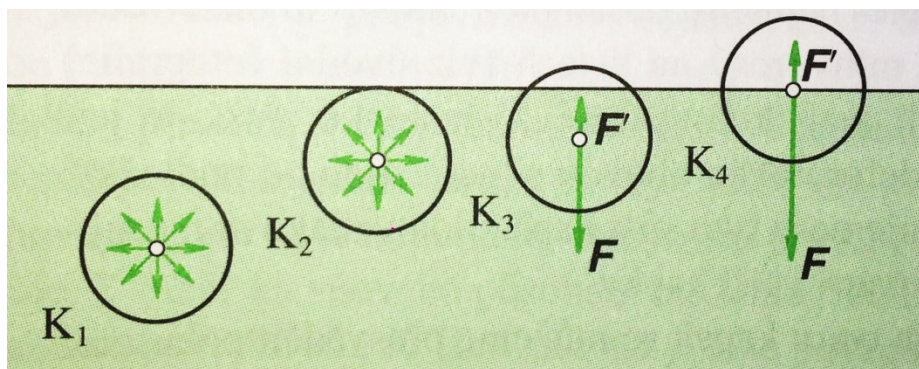
- povrchové napětí,
- kontaktní úhel,
- kapilární tlak,
- kapilární elevace a deprese,
- viskozita.

V textu mé práce se vyskytuje slovo kapilární v mnoha tvarech. Slovo pochází z latinského *capillus* = vlas. Kapilára je tedy velmi tenká (v praxi většinou skleněná) trubička s malým vnitřním průměrem (do 1 mm). Sousloví kapilární elevace a kapilární deprese pocházejí stejně tak z latinských sloves *e/evo* = zvedám výše a *deprimo* = stlačuji. [3]

1.1 Povrchové napětí

Text kapitoly vychází z [2] a [3].

V kapalinách jsou molekuly velmi blízko a působí na sebe navzájem v rámci sféry molekulového působení přitažlivými silami. Sféra molekulového působení je myšlená koule opsaná molekulou s poloměrem řádově 1 nm. Protože u hladiny nemají molekuly sféru působení zaplněnou stejně jako v objemu kapaliny, působí na všechny molekuly blízko hladiny síla (respektive výslednice sil ze sféry molekulového působení), která je vtahuje dovnitř kapaliny.



Obr. 1.1 – Vzájemné působení molekul ve sféře molekulového působení [3]

Při snaze o vyhnutí se definicím dalších pojmů, které nejsou pro kapilární metodu až tak podstatné, lze zjednodušeně říct, že výslednice všech sil působících na molekuly blízko hladiny je povrchová síla F , která se snaží maximálně zmenšit povrch kapaliny.

Tato povrchová síla pomáhá, společně s délkou okraje povrchové blány l , definovat podle [3] vzorec 1.1 pro velikost povrchového napětí σ .

$$\sigma = \frac{F}{l} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right] \quad (1.1)$$

Existuje několik více či méně zjednodušujících „definic“ vysvětlujících či popisujících povrchové napětí. Pro příklad uvádím vybrané:

- povrchové napětí vyjadřuje pružnost povrchové vrstvy kapaliny,
- povrchové napětí je energetický schodek na rozhraní mezi fázemi,
- povrchové napětí vyjadřuje sílu, která brání volnému zvětšování povrchu kapaliny.

Zejména poslední z výše uvedených „definic“ snad nejnázorněji popisuje, co povrchové napětí způsobuje.

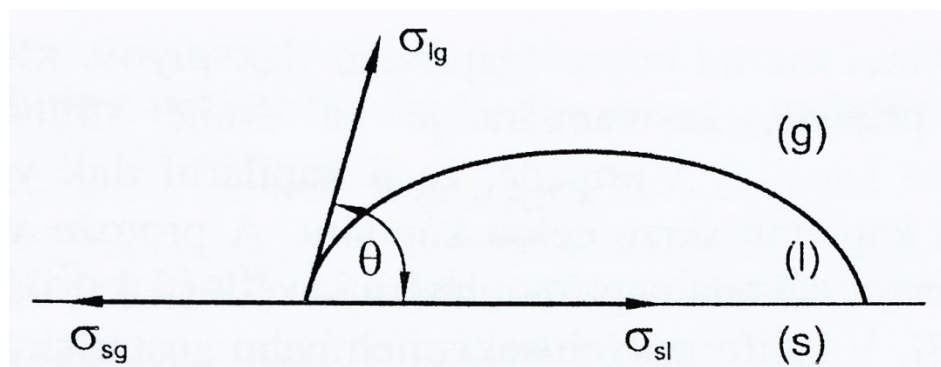
Jak souvisí povrchové napětí s kapilárním zkoušením? Povrchové napětí detekční kapaliny má vliv na smáčivost zkoušeného povrchu, neboť kapalina s nevelkým povrchovým napětím lépe smáčí povrch.

1.2 Kontaktní úhel a smáčivost

Kapitola vychází z [1], [2] a [3].

Chování kapaliny na rozhraní fází (kapalina, pevná látka a plynné okolí) ovlivňuje adheze a koheze kapaliny a adheze plynu.

Pozorovatelným výsledkem vzájemného působení různých fází je kontaktní úhel θ (často také označován jako krajový, stykový či úhel smáčivosti).



Obr. 1.2 – Smáčení pevné látky (s) kapalinou (l) v plynném prostředí (g) [1]
 σ_{sg} = mezipovrchové napětí mezi pevnou látkou a plynem, σ_{sl} = mezipovrchové napětí mezi pevnou látkou a kapalinou, σ_{lg} = mezipovrchové napětí mezi kapalinou a plynem; θ = krajový úhel

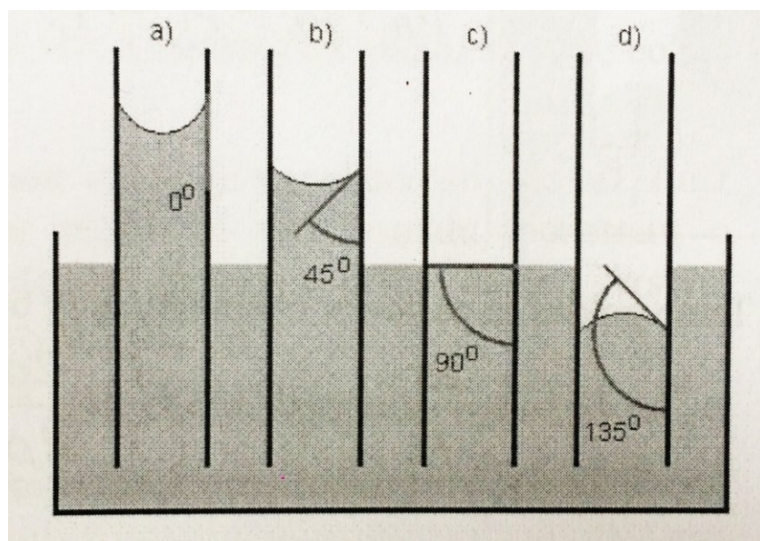
Velikost kontaktního úhlu závisí na rozdílu povrchového napětí pevného tělesa vzhledem ke vzduchu a vzhledem ke kapalině. Podle [1] se vypočítá ze vzorce 1.2.

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lg}} [-] \quad (1.2)$$

Kde σ jsou mezipovrchová napětí jednotlivých prostředí: sg mezi pevnou látkou a plynem, sl mezi pevnou látkou a kapalinou, lg mezi kapalinou a plynem. Značení ve vzorci odpovídá značení v obrázku 1.2.

Jak bylo uvedeno dříve, kvalita penetrantu je mimo jiné popsána jeho smáčivostí. Smáčivostí se rozumí schopnost kapaliny vytvářet stálý povrch na rozhraní s pevným tělesem za předpokladu, že z povrchu стекла přebytečná kapalina.

Kapaliny lze rozdělit podle velikosti kontaktního úhlu na smáčivé a nesmáčivé. Ideálně smáčivá kapalina má úhel $\theta = 0^\circ$, pro absolutně nesmáčivou kapalinu je $\theta = 180^\circ$. Mezi těmito hranicemi jsou kapaliny smáčivé ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) a kapaliny nesmáčivé ($90^\circ < \theta < 180^\circ$). Do hranice 90° hovoříme o spontánní smáčivosti, nad ní o tzv. nuceném smáčení. Je zřejmé, že případ absolutní nesmáčivosti je jen teoretický a nemůže ve skutečnosti nastat.



Obr. 1.3 – Možnosti smáčení v kapiláře [2]

Drsnost povrchu podkladu má také vliv na smáčivost kapaliny. Při zvýšení drsnosti povrchu dochází ke zlepšení smáčivosti. Tohoto poznatku se také (neúmyslně) využívá při zkoušení kapilární metodou, neboť drsnost stěn trhlin ve zkoušeném materiálu je zpravidla vyšší než na opracovaném povrchu, a lze proto pozorovat lepší smáčivost trhlin kapalinou.

Dalším příkladem tohoto tvrzení může být olej (či jiná mastná kapalina), která se po drsném povrchu roztéká, zatímco na povrchu méně drsném (např. leštěném) nikoliv.

Za dobrý penetrant lze považovat kapalinu, jejíž kontaktní úhel je menší nebo roven 10° . Pro uvedení souvislostí – v čisté skleněné nádobě má voda úhel kontaktu 8° , rtuť za stejných podmínek 128° .

1.3 Kapilární tlak

Text kapitoly vychází z [1] a [2].

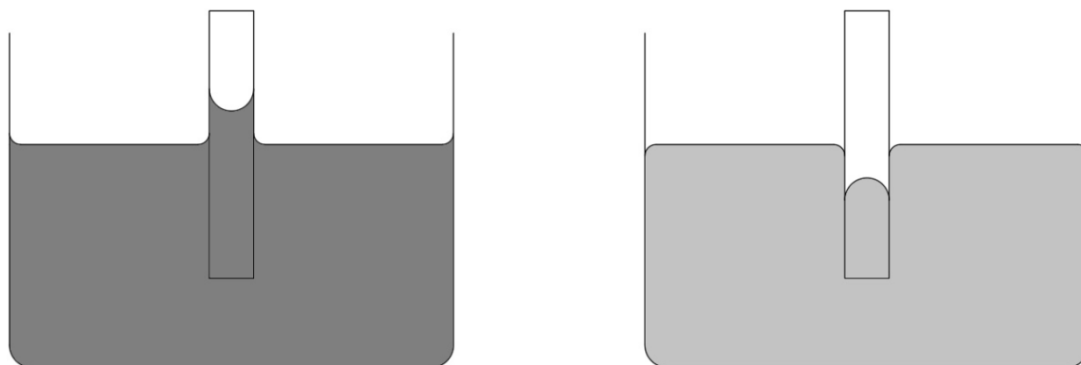
Když se vlivem smáčivosti povrch kapaliny zakříví, snaží se jej kapalina díky povrchovému napětí opět narovnat. V kapalině vzniká kapilární tlak, kterým působí horní vrstva kapaliny na vrstvy nižší. Kapilární tlak působí kolmo k povrchu kapaliny. Tento tlak se sčítá s kohezním tlakem v kapalině.

Kapilární tlak lze určit podle [1] z Youngova-Laplaceova vztahu (vztah 1.3).

$$p_k = \frac{2 \cdot \sigma}{R} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} \text{ [Pa]} \quad (1.3)$$

Kde je σ – povrchové napětí kapaliny; R – poloměr zakřivení povrchu kapaliny; θ – kontaktní úhel kapaliny; r – poloměr kapiláry.

Výsledný tlak v kapalině se skládá z kohezního a kapilárního tlaku. Výsledný tlak je tedy nižší (v případě konkávního zakřivení hladiny), nebo vyšší (v případě konvexního zakřivení hladiny), a v kapalině tak vzniká podtlak, či přetlak. Zde je vhodné zmínit, že konvexnost či konkávnost hladiny posuzujeme z pohledu kapaliny (jako bychom se dívali ze dna nádrže nahoru), tedy naopak v porovnání s pozorováním zvnějšku. Zakřivení hladiny bývá také často označováno jako vypouklé (= konvexní) či vyduté (= konkávní).



Obr. 1.4 – Konkávní (vlevo) a konvexní (vpravo) zakřivení hladiny [autor];
obrázek také ilustruje kapilární elevaci a depresi – viz kapitola 3.4

1.4 Kapilární elevace, kapilární deprese

Zdrojem informací pro tuto kapitolu je [2].

V přírodě platí, že celá soustava (jakákoliv) se snaží dostat do rovnováhy. V případě kapalin a kapilárních jevů jde o rovnost hydrostatického tlaku v celém objemu. Hydrostatický tlak je definován podle [2] vztahem 1.4.

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h \text{ [Pa]} \quad (1.4)$$

Kde je ρ – hustota kapaliny; g – tíhové zrychlení; h – výška kapaliny.

Je-li hladina konvexně zakřivená (vypouklá), kapilární tlak působí směrem dovnitř kapaliny a sčítá se (co do velikosti) s tlakem hydrostatickým. Aby byl tlak celé kapaliny v nádobě (i v kapiláře) stejný, musí hladina v kapiláře poklesnout. Tento jev se označuje jako kapilární deprese.

Pro konkávní (vydutou) hladinu platí, že kapilární tlak působí směrem ven z kapaliny – proti hydrostatickému tlaku. Dochází tedy k poklesu tlaku kapaliny. Aby byl výsledný tlak vyrovnán, hladina v kapiláře musí vystoupat výše (zvýší se hydrostatický tlak). Takový jev se označuje jako kapilární elevace.

Jak již bylo uvedeno, výsledný tlak kapaliny se skládá z kapilárního a hydrostatického tlaku. Vyjdu-li z podmínky jejich rovnosti, dojdou podle [2] ke vztahu 1.7 pro rozdíl výšky volné hladiny a hladiny v kapiláře.

$$p_k = p_h \quad (1.5)$$

$$\frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} = \rho \cdot g \cdot h \quad (1.6)$$

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \text{ [m]} \quad (1.7)$$

Kde je σ – povrchové napětí kapaliny; θ – kontaktní úhel kapaliny; ρ – hustota kapaliny; g – gravitační zrychlení; r – poloměr kapiláry.

Veličina h vyjadřuje v případě kapilární elevace výšku hladiny v kapiláře nad volnou hladinou, v případě kapilární deprese stlačení sloupce kapaliny v kapiláře pod volnou hladinu.

Právě kapilární elevace je podstatou kapilárního zkoušení. Hledané vady (necelistvosti) povrchu se chovají jako kapiláry – proto ve vztahu výše můžeme nahradit poloměr kapiláry r za šířku necelistvosti b . Uvážíme-li tento fakt pro vzorec kapilárního tlaku (vztah 1.3), shledáme, že čím menší bude šířka vady, tím bude kapilární tlak vyšší, což následně způsobí rychlejší elevaci penetrantu zpět na povrch vzorku.

Na začátku kapitoly bylo uvedeno, že penetrant je popsán mj. vzlínavostí. Vzlinavost znamená schopnost kapaliny prostupovat díky kapilární elevaci (tzn. přes kapiláry) materiálem. Typickým příkladem vzlínání (mimo obor této práce) je petrolej v knotu petrolejové lampy.

1.5 Viskozita

Text kapitoly čerpá informace z [1], [2] a [4].

Viskozita vyjadřuje míru vnitřního tření v kapalině. Zjednodušeně řečeno udává, jak snadno kapalina teče – vysoce viskózní kapalina je ve svém pohybu bržděna vnitřním třením více než jiná méně viskózní kapalina.

Viskozita je dvojitá – dynamická a kinematická. Dynamickou viskozitu η lze popsat jako konstantu úměrnosti tečného napětí v kapalině. Je vyjadřována v jednotce Pa·s. Kinematická viskozita ν je podíl dynamické viskozity a hustoty téže kapaliny. Její rozměr je $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Standardně je v technické praxi více používána viskozita kinematická.

Viskozita je závislá na teplotě. S rostoucí teplotou viskozita klesá. Literatura uvádí, že se zvýšením teploty o jeden stupeň Celsia poklesne kinematická viskozita cca o 2 %.

Kapilární zkoušku ovlivňuje viskozita tím, že příliš viskózní penetrant by potřeboval dlouhý čas pro vnik do necelistvostí, stejně jako pro vystoupení z nich zpět. Naopak příliš málo viskózní penetrant by vytvářel malou vrstvu na povrchu, a nemělo by tak z povrchu co do necelistvostí zatéct. Je proto třeba, aby viskozita penetrantu šla střední cestou.

Pro příklad uvádí tabulka přibližnou kinematickou viskozitu používaných penetračních prostředků. Reálná hodnota viskozity by se neměla od těchto hodnot lišit o více než 10 %.

Tab. 1.1 – Hodnoty kinematické viskozity různých penetračních prostředků [4]

Látka	Kinematická viskozita	Jednotka
petrolej	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
nesmyitelné penetranty	6 až $12 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
smyitelné penetranty	12 až $14 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
emulgátory	$7 \cdot 10^{-5}$ až $1,6 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

1.6 Souhra všech fyzikálních činitelů

Jak uvádí [1], kapilární zkoušení vyžaduje používání penetrantů vhodných vlastností – tzn. dobré pronikání do vad, snadná odstranitelnost přebytku z povrchu a dobré vztlínání zpět na povrch. Z toho vyplývá, že penetrant by měl mít vyšší povrchové napětí, malý krajový úhel a nízkou viskozitu.

Všechny jmenované vlastnosti musí být v souladu. Pokud bych parafrázoval tvrzení o síle řetězu, tak penetrant je jen tak dobrý, jak dobrá je jeho nejméně vhodná vlastnost.

Pro ilustraci lze uvést jako příklad vodu. Ta má sice vysoké povrchové napětí a nízkou viskozitu, nicméně její kontaktní úhel je s většinou pevných látek příliš velký. Proto není voda vhodným penetrantem. Bylo by sice možné přidat do vody smáčedla, která by zlepšila kontaktní úhel, ale bohužel tyto látky zároveň snižují povrchové napětí. Zlepšení vlastností by tak nebylo velké.

2 Použití a použitelnost metody

Mezi hlavní přednosti kapilární metody nedestruktivního zkoušení patří její univerzálnost, jednoduchost, rychlost a ekonomičnost. Následující text shrnuje informace z [1], [2] a [4].

Kapilárním zkoušením můžeme odhalit veškeré, i velmi jemné, povrchové nečistosti ve všech směrech – trhliny, porezitu, studené spoje apod. Odhalení vnitřních diskontinuit nesouvisejících s povrchem materiálu není možné. Při zkoušení mělkých a prostorových vad na povrchu široce rozevřených nemusí být výsledek zkoušky relevantní, neboť může dojít k vymytí penetrantu během mezičištění. Typickým příkladem těchto vad jsou např. bubliny na odlitcích.

Rozměry ani tvar a v omezené míře (viz dále) ani materiál zkoušené součásti nemají tak velký omezující vliv jako u jiných nedestruktivních metod.

Kapilární metodu lze použít na řadu různých materiálů. Na materiály kovové – austenitické oceli, barevné či lehké kovy, slitiny – i na materiály nekovové – glazovaná keramika, sklo, plasty. A na mnoho dalších materiálů.

Zkoušený materiál musí plnit pouze několik podmínek – nesmí být porézní, savý či reagující se zkušebními prostředky. Typickým příkladem materiálů, které nelze kapilárně zkoušet, jsou některé druhy plastů a nepolévaná keramika.

Ekonomičnost celého procesu zkoušení zajišťují relativně nízké investiční i provozní náklady na zkušební prostředky a vybavení zkušební laboratoře. Také rychlost zkoušky příznivě ovlivňuje ekonomičnost metody, neboť zkouška nezdržuje zaměstnance zbytečně dlouhou dobu. Pro příklad lze uvést, že přenosný kapilární set (barevný penetrant, čistič, vývojka – vše ve spreji) lze pořídit za cca 600 Kč.

Jednoduchost zkoušky spočívá zejména v jednoduchosti postupu. Neprovede-li zkoušející zásadní chybu v postupu, není skoro možné zkoušku pokazit. Vyhodnocení zkoušky může už jistá rizika omylu skýtat.

2.1 Rozdělení kapilárních metod

Kapitola vychází z [2] a [5].

Z hlediska druhu indikace a jejího hodnocení můžeme kapilární metody rozdělit do tří kategorií:

- metoda barevné indikace,
- metoda fluorescenční,
- metoda dvojúčelová (duální).

V případě metody barevné indikace vznikají barevné indikace na kontrastním podkladu (většinou červená indikace na bílém podkladu). Hodnocení probíhá v denním či umělém bílém světle.

Metoda fluorescenční spoléhá na zviditelnění indikace po osvětlení UV světlem, přičemž očištěná plocha zůstává tmavá, ale indikace světélkují žlutozeleně.

Metoda dvojúčelová spojuje obě výše zmíněné metody do jedné. Při vyhodnocování si můžeme zvolit, kterou z možností použijeme, neboť indikace jsou při osvětlení bílým světlem barevné na kontrastním pozadí, ale při osvětlení UV světlem světélkují oranžově.

3 Kapilární prostředky

Jako kapilární prostředky označujeme veškerá činidla potřebná pro zkoušení kapilární metodou. Všechna spolu dohromady tvoří tzv. kapilární soubor (set), který by měl být od jednoho výrobce. Mezi kapilární prostředky podle [1] patří

- penetranty (detekční kapaliny),
- emulgátory,
- vývojky,
- čističe, odmašťovače (rozpouštědla).

3.1 Penetranty

Informace čerpány z [1], [2]. Penetrant je kapalina, která nanесena na kontrolovaný povrch proniká do jeho necelistvostí, kde zůstane v dostatečném množství i po odstranění jejího přebytku z povrchu. Penetrant nejvíce ovlivňuje kvalitu a citlivost zkoušky, proto je třeba jeho vlastnostem věnovat patřičnou pozornost.

Penetrant je tvořen směsí kapalných ropných produktů a organických rozpouštědel. Do této směsi je přidána látka, která zviditelní vadu – výrazné barvivo nebo luminoфор. Navíc mohou být přidány inhibitory koroze, prostředky pro odstranění zápachu a prostředky pro zlepšení smáčivosti.

Zbarvení penetrantu barvivem by mělo být velmi syté. Barevné penetranty jsou nejčastěji červené, případně modré. Díky sytosti barvy lze docílit s bílou vývojkou kontrastu až 9:1.

Kontrast fluorescenčních penetrantů je řádově vyšší – až 1000:1. To je důvod, proč je obecně fluorescenční metoda citlivější než metoda barevná. Navíc při srovnání tloušťky vrstvy penetrantu potřebné k dosažení velkého kontrastu shledáme, že fluorescenční metoda si vystačí s tenčí vrstvou.

Penetranty lze rozdělit podle různých hledisek:

- **podle druhu indikace** na penetranty barevné, fluorescenční a dvojúčelové,
- **podle smytelnosti vodou** na penetranty nesmyitelné a smyitelné, přičemž penetranty nesmyitelné nelze dokonale odstranit vodou, zatímco penetranty smyitelné díky obsahu emulgátoru odstranit vodou lze,
- **podle obsahu emulgátoru** na emulgační a postemulgační penetranty.

Emulgační penetranty obsahují emulgátor již před aplikací, je tedy vnesen i do necelistvostí. Naproti tomu postemulgační penetranty jsou emulgované až následně. To znamená, že na přebytek penetrantu na povrchu je nanесen emulgátor, který umožní jeho odstranění, zatímco v necelistvostech neemulgovaný penetrant zůstává.

3.1.1 Vlastnosti penetrantů

Vlastnosti penetrantů nejvíce ovlivňuje nosné médium penetrantu. Nezřídka se ale stává, že vlastnosti požadované po penetrantu jsou navzájem protichůdné.

Požadavky na zkoušení vlastností specifikuje norma ČSN EN ISO 3452-2. U penetračních kapalin sledujeme zejména tyto vlastnosti:

1) Penetrační schopnost

Závisí na nosném médiu, viskozitě a kontaktním úhlu (respektive smáčivosti). Vzhledem k závislosti na viskozitě se mění s teplotou (viz kap. 1.5).

2) Těkavost

Těkavost se posuzuje pomocí tlaku par nad volnou hladinou kapaliny – tzn. určuje, jak snadno se kapalina odpařuje. U penetračních prostředků musí být těkavost nízká, aby nedocházelo k vysychání penetrantu v necelistvostech. Nízká těkavost je i bezpečnostním hlediskem, protože by mohlo dojít k požáru či výbuchu nahromaděným par např. u kapilárních linek.

3) Bod vzplanutí

Bodem vzplanutí se myslí teplota, při níž hořlavé páry vytvoří nad celou hladinou za standardních podmínek výbušnou směs, je-li přiblížen otevřený plamen.

Vzhledem k běžnému rozsahu teplot při zkoušce je vhodné, aby bod vzplanutí byl vyšší než 50 °C. Lze však tolerovat i nižší hodnotu v případech, že se pracuje jen s malým množstvím penetrantu.

4) Chemická netečnost

Penetrant nesmí narušovat skladovací nádoby ani zkoušené povrchy (např. koroze). Pro eliminování možnosti vzniku koroze jsou do penetrantů přidávány inhibitory koroze. I přesto ale platí, že po provedení zkoušky je třeba zkoušený povrch zbavit zbytků penetrantu.

Přes snahu o chemickou netečnost penetrantů mohou u některých materiálů nastat například tyto obtíže:

- u hořčnatých a hliníkových součástí při zkoušení emulgačními penetranty s vyšším obsahem emulgátorů – riziko vzniku koroze,
- u niklových, titanových a austenitických materiálů při použití penetrantů s obsahem halogenidů – riziko korozního praskání a bodové koroze,
- u některých plastových materiálů – riziko naleptání povrchu, poškození celé součásti.

5) Rozpouštěcí schopnost nosného média

Nosné médium musí být dobrým rozpouštědlem barviva nebo luminoforu při normálních teplotách, ale i nad či pod teplotním rozsahem použitelnosti. Tím je dosažena dobrá sytost indikací (přímá závislost na koncentraci barviva/luminoforu v penetrantu).

6) Toxicita a zápach

Běžné použití penetrantu nesmí ohrozit lidské zdraví ani životní prostředí, stejně tak nesmí působit nepříznivě na pracovní a hygienické podmínky. Z těchto důvodů je kladen důraz na nejedovatost a minimalizaci zápachu.

Veškerá rizika spojená s používáním penetrantu musí uvést výrobce v bezpečnostním listu, který je nedílnou součástí dodávky.

7) Elektrická vodivost

Vysoká elektrická vodivost je vyžadována jen pro naprašování penetrantu elektrostatickou pistolí.

3.2 Emulgátor

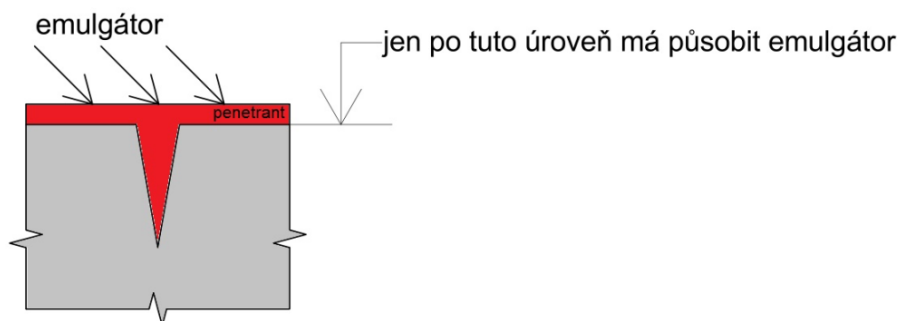
Text kapitoly vychází z [2].

Emulgátor je povrchově aktivní látka, která umožňuje rozptýlení pevných nebo kapalných látek v kapalině, v níž se normálně nerozpouštějí. Emulgátory slouží k odstranění přebytku penetrantu vodou.

Základy emulgátorů mohou být triethanolamin, kyselina oleinová, kyselina adipová, případně jejich stearany a oleje. Základy mohou být i kombinovány.

Emulgátory lze rozdělit na hydrofilní (vodou ředitelné) a lipofilní (na olejové bázi). Zbytky lipofilního emulgátoru ve směsi s vodou nejsou biologicky odstranitelné, proto je snaha o používání převážně hydrofilních emulgátorů.

V případě postemulgačního zkoušení musí být nanesen emulgátor jen na takovou dobu, aby byla emulgována jen svrchní vrstva (přebytek) penetrantu, nikoliv penetrant v necelistvostech. Čas, po který je nanesen emulgátor, se nazývá emulgační čas a označuje se t_e .



Obr. 3.1 – Působení emulgátoru [autor]

Na emulgátory jsou kladeny požadavky tak, aby bylo možno emulgační proces kontrolovat, zajistit bezpečnost pracovníků a ekonomičnost procesu. Vhodný emulgátor musí zajistit:

- vhodnou rychlost emulgace – tzn. aby dlouhý emulgační čas neprodužoval neúměrně dobu zkoušky, ale zároveň aby emulgace neproběhla natolik rychle, že by nebyla kontrolovatelná,
- snadnou reakci s penetrantem na povrchu,
- použitelnost i pro otevřené nádrže – nízká těkavost, vyšší bod vzplanutí, bez zápachu, netoxický,
- ekonomičnost procesu – samotný emulgátor nesmí cenu zkoušky příliš zvyšovat.

3.3 Vývojka

Zdrojem informací kapitoly je [1], [2].

Vývojka se nanáší na zkoušený povrch po odstranění přebytku penetrantu. Její částice vytvářejí na povrchu vlastní kapilární systém, jímž vzlíná penetrant z necelistvostí na povrch. Pomocí absorbce a adsorbce penetrantu umožňuje vznik indikací a zvyšuje jejich jas.

Vývojky se skládají z nosného média (vzduch, aceton, líh, benzin, voda aj.) a práškovité složky. Práškovitá složka má jemnou zrnitost, je bílé barvy a musí být nehydroskopická. Jako práškovitá složka může být použit oxid zinečnatý, oxid hořečnatý, uhličitán hořečnatý, uhličitán vápenatý, kaolin, mastek, amorfni křemičitany aj.

V případě barevné metody vytváří vývojka bílé pozadí, čímž zlepšuje kontrast indikací. U fluorescenční metody není toto nutné.

Vývojky lze rozdělit podle nosného prostředí na tři druhy:

- suchá vývojka,
- mokrá těkává vývojka,
- mokrá vodná vývojka.

Suché vývojky patří mezi nejméně citlivé, proto je lze využít jen s fluorescenčním penetrantem. Nosným médiem je vzduch či jiný hnací plyn. Tyto vývojky se na zkoušený povrch naprašují.

Mokré těkávé vývojky se nejvíce využívají při ručním zkoušení. V těkavém rozpouštědle je rozptýlena práškovitá složka. Po nanesení této vývojky na povrch dojde k odpaření těkávé složky – rozpouštědla. Nejčastějším aplikačním postupem je nástřik – ze spreje, stříkací pistolí či rozprašovačem.

Základem mokrých vodných vývojek je voda se smáčedly. Rozeznáváme dva druhy mokrých vodných vývojek – disperzní a rozpustné. V případě disperzní vodné vývojky je prášková složka rozptýlena do objemu, vzniká suspenze. U rozpustných vodných vývojek je prášková složka zcela rozpuštěna ve vodě. Mokrý vodný vývojky bývají často před aplikací předeřátý a jsou nanášeny ponorem. Při použití mokré vodné vývojky není třeba zkoušený povrch po mezičištění sušit.

Zvláštní kategorií vývojek je tzv. snímatelná vývojka. Po odpaření nosného média se vytvoří snímatelný film, který lze po uplynutí vyvolávacího času (vzniku indikací na vývojce) sloupnout a použít pro zdokumentování (případně i archivování) indikací. Tento typ vývojek nebývá používán často. Svůj vliv na tom má i jeho vyšší cena. Navíc v dnešní době lze kvalitně zdokumentovat indikace i pořízením fotografie.

3.3.1 Vlastnosti vývojek

Stejně jako na ostatní prvky zkušebního systému, je i na vývojky kladena řada požadavků, které zajišťují použitelnost a správnou citlivost metody.

Požadavky na vývojky lze shrnout do tohoto seznamu:

- velmi dobrá sorpce – zajišťuje vztlínání dostatečného množství penetrantu,
- jemná zrnitost – pro správné zviditelnění indikací (ostrost, výraznost),
- dobré krycí vlastnosti – umožňuje kontrast s penetrantem zakrytím původní barvy povrchu,
- snadné nanášení,
- tvorba jemného povlaku,
- dobrá smáčivost detekční kapalinou,
- snadná odstranitelnost,
- netečnost vůči materiálu zkoušené součásti,
- zdravotní nezávadnost,
- absence vlastní fluorescence,
- nepohlcování UV záření.

Poslední dva body výčtu platí pro zkoušení fluorescenční nebo duální metodou.

3.4 Čističe, odmašťovače

K odstranění tuku či oleje ze zkoušeného povrchu před nanesením penetrantu slouží odmašťovač. Je to chemické činidlo organického či anorganického původu. Jako odmašťovače mohou sloužit organická rozpouštědla (aceton, benzin, chlorovaná rozpouštědla atd.) anebo anorganické látky (např. zředěný hydroxid sodný nebo draselný). [1]

K odstranění přebytku penetrantu ze zkoušeného povrchu po uplynutí penetračního času slouží čistič. Základem čističe bývají organická rozpouštědla. K základu mohou přidány emulgátory či jiné látky.

Jako čistič může být použito i jen samotné organické rozpouštědlo. Při takovém postupu ovšem hrozí vymytí penetrantu z vad.

3.5 Klasifikace zkušebních prostředků

Klasifikaci zkušebních prostředků uvádí norma [6] (viz tabulka 3.1).

Zkušební systém je dán označením ve formátu „typ metoda forma“. Za tímto označením by měla následovat číslice udávající citlivost systému určené na kontrolní měrce typu 1 podle ČSN EN ISO 3452-3.

Například víme-li, že zkouška probíhala fluorescenčním penetrantem posléze očištěným vodou a se suchou vývojkou, odečteme z tabulky správné označení systému IAa.

Tab. 3.1 – Klasifikace zkušebních prostředků [6]

Penetrant		Prostředek k odstranění přebytku penetrantu		Vývojka	
Typ	Označení	Metoda	Označení	Forma	Označení
I	Fluorescenční penetrant	A	Vodou smytelný	a	Suchý prášek
II	Barevný kontrastní penetrant	B	Postemulgační, lipofilní	b	Vodný roztok
III	Penetrant dvouúčelový (fluorescenční barevný kontrastní penetrant)	C	Odstranitelný rozpouštědlem ^{a)} : - Třída 1, halogenový - Třída 2, nehalogenový - Třída 3, speciální aplikace	c	Vodná suspenze
				d	Na bázi rozpouštědla (bezvodá pro typ I)
		E	Odstranitelný vodou a rozpouštědlem	e	Na bázi rozpouštědla (bezvodá pro typ II a III)
				f	Speciální aplikace

Ve speciálních případech je nezbytné použití prostředků pro kapilární zkoušku v souladu se zvláštními požadavky na hořlavost, obsah síry, halogenů a sodíku a dalších kontaminantů. Viz ISO 3452-2.

^{a)} Třída metody C není součástí označení

4 Postup kapilárního zkoušení

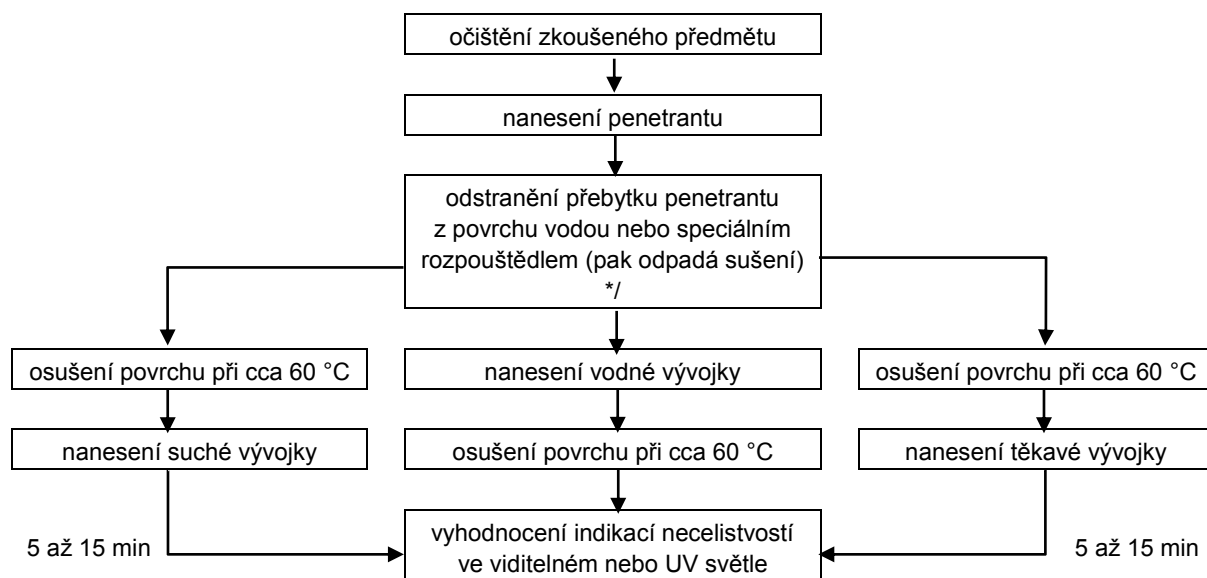
Zkouška se skládá z dílčích úkonů, z nichž každý plní určitou funkci a má předem danou dobu trvání. Zkoušku lze podle [2] rozdělit do sedmi dílčích kroků:

- příprava a předčištění zkoušeného povrchu,
- aplikace penetrantu,
- mezičištění,
- aplikace vývojky,
- vyvolávání, inspekce povrchu,
- zápis a vyhodnocení indikací,
- konečné čištění.

Každému z kroků zkoušky je věnována jedna podkapitola. Protože se tato kapitola má věnovat postupu zkoušení obecně, je navíc poslední podkapitola věnována použití kapilárních metod při abnormálních teplotách, byť v principu se postup zkoušení neliší.

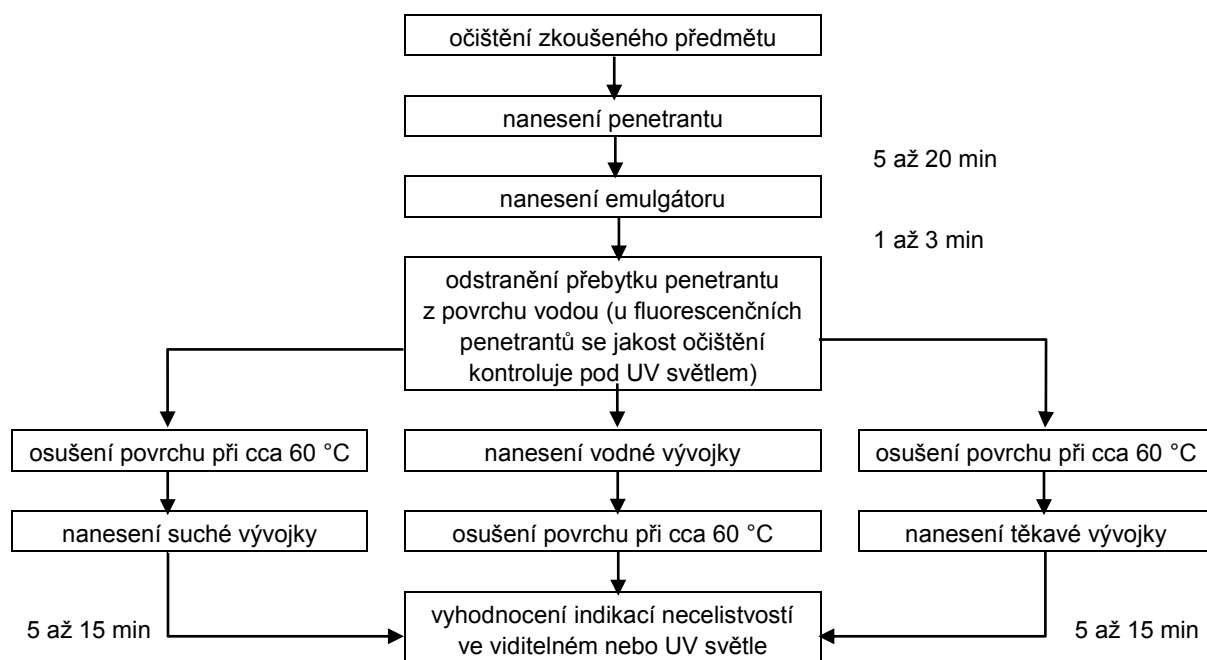
Lepší představu o postupu při zkoušce poskytují dvě převzatá schémata zkušebních postupů.

Tab. 4.1 – Schéma normálního nebo emulgačního postupu [2]



*/ Kontrola očištění povrchu u fluorescenčních metod se výhodně provádí pod UV světlem

Tab. 4.2 – Schéma postemulgačního postupu [2]

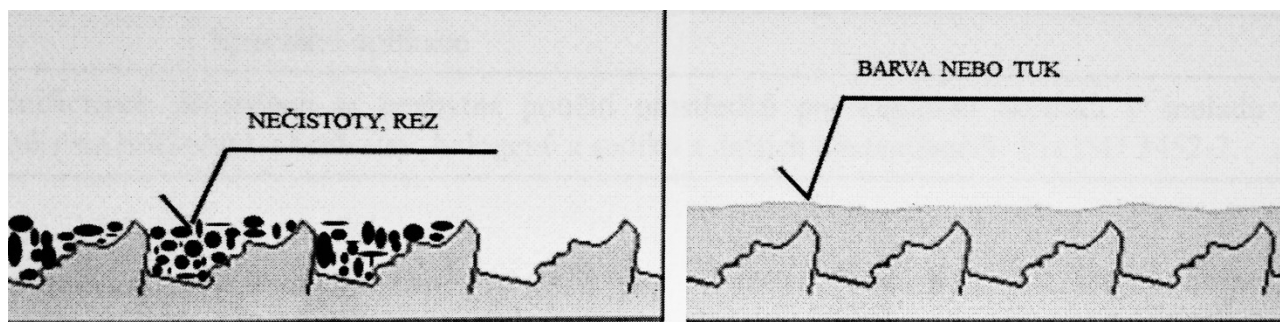


4.1 Příprava a předčištění zkoušeného povrchu

Text vychází z [2], [6].

Slova příprava a předčištění souhrnně označují činnosti, které připravují zkoušený povrch pro nanesení penetrantu tak, aby penetrant mohl vnikat do necelistvostí. Veškeré nečistoty totiž mohou ulpívat v necelistvostech a tím zabraňovat vníkaní penetrantu, nebo naopak způsobovat falešné indikace.

Rozsah předčištění je nutno upravit podle instrukce ke zkoušení – minimálně však tak, aby nemohlo dojít k ovlivnění zkoušky neupraveným povrchem. Z povrchu je třeba odstranit veškeré povlaky a nečistoty (nátěr, mazivo, rez, okuje, struska), případně lze upravit drsnost povrchu či povrch naleptat (poslední zmíněné jen ve výjimečných případech). Čištění může probíhat mechanicky, fyzikálně, chemicky či kombinací všech způsobů.



Obr. 4.1 – Povrch před čištěním [2]

Mechanické čištění zajišťuje nejčastěji jen odstranění hrubých nečistot. Bývá provedeno kartáčováním ocelovým kartáčem, broušením, smirkováním, otryskáváním, otryskáváním tlakovou vodou nebo ofoukáváním stlačeným vzduchem. Čistě mechanické očištění není dostačující a mohou hrozit i jistá rizika, např. při otryskávání hrozí zatemování (uzavření) povrchových vad vlivem plastické deformace na povrchu součásti, v případě broušení hrozí vyplnění necelistvostí jemným brusným prachem.

Jako fyzikální čištění může být použito elektrolytické odmašťování nebo čištění ultrazvukem. Prakticky dochází k propojení s chemickým čištěním, neboť čištění ultrazvukem probíhá v tzv. ultrazvukové vaně při ponoření do vhodného rozpouštědla (voda či jiný čisticí roztok).

Chemické čištění bývá prováděno různými čističi na bázi rozpouštědel. Čisticí prostředek je nutné volit s rozvahou, neboť by mohl reagovat s čištěným povrchem. Stejně tak je nutné odstranit po čišťení veškeré zbytky čističe, protože by mohl nevhodně reagovat s penetrantem (např. zabráněním fluorescenci – chromany a kyseliny), anebo by mohl způsobit pozdější korozi součásti.

Odstranění zbytků čističe se provádí otřením, nebo oplachem s následným osušením. Osušení musí být důkladné – hrozí zabránění vniknutí penetrantu do necelistvostí vinou přítomnosti čisticího prostředku nebo oplachového média v necelistvosti.

Důvodem chemického čištění je odmaštění povrchu. Nejčastěji se proto setkáváme s odmašťováním hadrem nasáklým rozpouštědlem, odmašťováním v parách rozpouštědla, anebo odmašťováním vyvařováním.

Za přípravu povrchu lze také považovat úpravu teploty zkoušené součásti. Zkoušení běžnými penetračními prostředky musí probíhat podle normy [6] v rozmezí teplot 10 až 50 °C. Jsou-li teplotní podmínky zkoušení jiné, je třeba tomuto faktu přizpůsobit celý zkušební postup, viz kapitola 4.8 nebo normy ČSN EN ISO 3452-5, ČSN EN ISO 3452-6.

4.2 Aplikace penetrantu

Následující text zmiňuje informace z [1], [6].

Penetrant lze na zkoušený povrch nanášet nástřikem, natíráním, poléváním, nebo ponořením.

Aby mohla detekční kapalina proniknout do všech necelistvostí povrchu, je třeba ji nechat působit (zatékat) po určitou dobu. Tato doba je označována jako penetrační čas t_p , a ten je pro zkoušku předepsán.

Penetrační čas závisí na vlastnostech penetrantu, teplotě, zkoušeném materiálu a druhu zjišťovaných nespojitostí. Norma [6] doporučuje penetrační čas v rozmezí 5 až 60 minut, v praxi je běžnější 5 až 20 minut. Ve zcela mimořádných případech může

být penetrační čas delší (i několik hodin) – zde je však třeba přizpůsobit podmínkám zkoušky volbu penetrantu, aby nedocházelo k jeho zasychání.

V praxi většinou platí dohoda o délce penetračního času, tzn. že čas penetrace je roven času vyvíjení ($t_p = t_v$).

Na zkoušeném povrchu by měla být penetranem vytvořena souvislá rovnoměrná vrstva. Tato vrstva musí být na povrchu po celý penetrační čas – je tedy možné ji udržovat přidáváním penetrantu.

Pronikání penetrantu do necelistvostí lze urychlit fyzikálními postupy vycházejícími z vlastností zmíněných v kapitole 1. Možnosti jsou:

- ohřev penetrantu – ovšem s rizikem, že může dojít k vypařování nosného média,
- ohřev zkoušené součásti – přičemž teplota nesmí překročit 50 °C,
- působení vibrací (mechanických nebo ultrazvukových) na zkoušenou součást,
- snížení okolního tlaku – náročný způsob využívaný v praxi jen v případě požadavku na vysokou citlivost zkoušky, neboť může dojít ke zkrácení potřebného penetračního času až na jednu desetinu původní hodnoty.

4.3 Mezičištění

Kapitola vychází z [1], [2] a [6].

Fáze mezičištění spočívá v odstranění přebytku penetračního prostředku z povrchu. Příliš důkladné mezičištění není vhodné z důvodu možnosti vymytí penetrantu z necelistvostí. Proto je spíše tolerováno mírné pozadí penetrantu na vývoje.

Odstranění penetrantu z povrchu lze docílit různými způsoby – podle druhu penetrantu a požadované citlivosti zkoušky. V případě použití postemulgačního penetrantu je třeba před mezičištěním nanést emulgátor a nechat jej působit po dobu emulgačního času. Detaily použití emulgátoru popisuje více norma [6]. Podle této normy se smí nanášet hydrofilní emulgátor ponořením, nebo ve formě pěny, zatímco lipofilní emulgátor smí být aplikován jen ponorem.

Odstranění penetrantu jako takového lze potom provést vodou, rozpouštědlem nebo kombinovaně (zejména při použití emulgačního penetrantu). Očištění vodou se provádí navlhčenou utěrkou nebo ostřikem. Teplota vody nemá přesáhnout 50 °C a nesmí být nanášena pod tlakem (v případě ostřiku). Při použití ředidla použijeme utěrkou lehce navlhčenou v ředidle.

Jakákoli jiná metoda mezičištění musí být dohodnuta smluvními stranami, neboť hrozí vymytí penetrantu z necelistvostí.

Po provedení mezičištění následuje vizuální kontrola odstranění penetrantu z povrchu. V případě barevné metody je vidět zůstatek penetrantu na povrchu při bílém

světla, v případě fluorescenční metody je potřeba použít zdroj UV-A záření pro kontrolu přebytku penetrantu. Je-li pozadí příliš výrazné, je třeba pokračovat v mezičištění.

Norma [6] stanovuje minimální požadavky pro kontrolu mezičištění při fluorescenční metodě na intenzitu osvětlení UV-A zářením 1 W/m^2 , zároveň viditelné světlo nesmí mít více než 100 lx. Tatož norma předepisuje minimální intenzitu bílého světla 350 lx pro kontrolu mezičištění při barevné metodě.

Zejména v případě mezičištění oštěrkem vodou je nutné zařadit za/do fáze mezičištění také sušení. Sušení musí být provedeno vždy, když by mohla aplikaci vývojky vadit zvýšená vlhkost povrchu.

Sušení je nutno provádět tak, aby nedocházelo k omezení penetrantu v necelistvostech (např. vysušením, vyfoukáním apod.). Norma [6] uvádí možné vhodné způsoby osušení povrchu:

- otřením čistou suchou utěrkou nepouštějící vlas,
- odpařováním při teplotě okolí po ponoření do teplé vody,
- odpařováním při zvýšené teplotě,
- osušením v proudu vzduchu,
- kombinací výše uvedených způsobů.

4.4 Aplikace vývojky

Text vychází z [1], [2] a [6].

Vývojku lze nanášet na zkoušený povrch řadou způsobů s ohledem na typ vývojky (suchá, mokrá). K jednotlivým typům byl způsob vhodného nanášení uveden v kapitole 3.3, proto zde již jen vyjmenuji, že vývojku lze nanášet naprašováním, stříkací pistolí, zaprašováním, zasypaním, nástřikem či ponorem. Zcela nevhodné je nanášení vývojky štětcem, neboť hrozí vymytí penetrantu z necelistvostí.

Vývojka musí být udržována v homogenním stavu. Nanášení má být zahájeno bezprostředně po dokončení odstranění přebytku penetrantu respektive bezprostředně po osušení.

Cílem nanášení je vytvoření rovnoměrné nepříliš silné vrstvy vývojky. Příliš silná vrstva vývojky může způsobit snížení sytosti probarvení, nebo dokonce omezit vznik indikace jako takové. Lokální nahromadění vývojky je i proto nepřijatelné.

Vyvíjecí (vyvolávací) čas t_v je doba, po níž vývojka působí na zkoušený povrch. Podle normy [6] by se měl pohybovat v rozmezí 10 až 30 minut, ovšem smluvní strany mohou rozhodnout jinak. Výrobce vývojky může předepsat vhodný vyvíjecí čas pro daný zkušební systém. Čas se počítá ihned po nanesení v případě suché vývojky a ihned

po osušení při použití mokré vývojky. Zde je osušením míněno vypaření nosného média vývojky.

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.2, v praxi většinou platí dohoda o délce vyvíjecího času, tzn. že čas penetrace je roven času vyvíjení ($t_p = t_v$).

4.5 Vyvolávání, inspekce povrchu

Obsah této kapitoly čerpá ze zdrojů [1], [2] a [6].

Provedení inspekce povrchu je věcí zkušenosti a pečlivosti pracovníka. Vzhledem k tomu, že kapilární zkoušky jsou vyhodnocovány vizuálně, je pro pracovníka nutností mít platné potvrzení o zrakové způsobilosti.

Indikace na povrchu zjišťuje pracovník okem, případně pomocí zvětšovacích pomůcek (např. lupy).

V případě barevné metody je povrch pozorován v denním nebo umělém světle, které osvětluje pracovní plochu rovnoměrně. Je-li použito umělé světlo, má mít teplotu chromatičnosti (barevnou teplotu světla) vyšší než 2500 K, lépe však nad 3300 K. Intenzita osvětlení na pracovní ploše (zkoušeném povrchu) je kontrolována luxmetrem v pracovních podmínkách. Intenzita světla musí být alespoň 500 lx, může ale také být vyžadována intenzita vyšší.

Pozorování indikací fluorescenční metody probíhá v zatemněném prostoru pod osvětlením UV-A zářením. Před pozorováním povrchu je nutná adaptace oka pracovníka na aktuální světelné podmínky. Jako dobu adaptace uvádí norma alespoň jednu minutu, jiné zdroje však doporučují dobu vyšší (5 až 15 minut). Obecně je ale doba adaptace u každého člověka různá. Po adaptaci by neměl pracovník přecházet ze zatemněného prostoru do prostoru normálně osvětleného, provádí-li hodnocení.

Zdroj UV-A záření musí mít před prováděním inspekce dostatek času, aby dosáhl požadované intenzity záření. Tuto dobu garantuje výrobce zdroje (např. pro rtuťové lampy je 10 minut od zapnutí). Ozáření zkoušeného povrchu musí být rovnoměrné. Normou daná intenzita UV-A záření na zkoušeném povrchu musí být minimálně 10 W/m², ovšem současně musí být splněna podmínka úhrnu UV-A záření a viditelného světla - nižší než 20 lx na zkoušeném povrchu.

Konečné posouzení indikací se provádí po uplynutí vyvíjecího času. Lze však doporučit pozorování vzniku indikací v pravidelných intervalech již od nanesení vývojky. Takto lze lépe odhalit původ indikace a předejít tak její mylné interpretaci (např. výsledná indikace vznikne rozpitím více menších indikací, byť nejde o souvislou vadu).

4.6 Zázpis a vyhodnocení indikací

Po uplynutí vyvíjecího času lze hodnotit získané indikace. V některých případech není potřeba indikace zaznamenávat, neboť zkouška měla pouze zjistit stav součásti (např. bezprostředně po výrobě – je předpokládán bezvadný stav). Většinou je však nutné polohy a velikost indikací zaznamenat.

Záznam lze provést podle [2] různými způsoby:

- nákresem (náčrtem) zkoušené oblasti a nalezených indikací,
- písemným popisem,
- snímatelnou vývojkou,
- lepicí páskou,
- fotografií,
- videozáznamem.

Záznam náčrtem je pravděpodobně nejpoužívanějším způsobem záznamu, protože je rychlý a snadný. V dnešní době už ale není problém pořízení fotografie povrchu s indikacemi a přiložení této fotografie k protokolu o zkoušce či její archivování. Použití snímatelné vývojky není časté z důvodu vyšších nákladů. Levnější variantou je použití průhledné lepicí pásky, která se přitiskne k povrchu a poté nalepí do protokolu o zkoušce. Indikace totiž zůstává na pásce obtisknuta.

Provedení záznamu indikací by mělo být přesné. U nepřipustných indikací slouží jejich poloha a rozměry pro potřeby pozdější opravy. Záznam přípustných indikací lze použít pro vyhodnocení stavu součásti v čase – zda se velikost indikací mění.

Samotné vyhodnocení indikací se provádí podle kritérií zadavatele zkoušky, většinou však podle odpovídajících výrobních norem. Normy dále uvádějí podmínky přípustnosti, případně i mez registrace necelistvosti – každá výrobní norma je v tomto ohledu jiná.

Kritéria přípustnosti mohou být v zásadě tří typů – nominální, ordinální nebo metrická. Nominální nepřipouštějí konkrétní typ vady, ordinální udávají srovnání v referenčním katalogu, metrická vycházejí ze změřené velikosti indikace.

V závěru vyhodnocování je potřeba vypracovat protokol o zkoušce. Protokol nemusí být vypracován pouze v případě, že je dostupný zkušební postup, který obsahuje veškeré potřebné informace (včetně údajů o provedení zkoušky) a zároveň zaznamenává dostatek informací o nalezených indikacích.

Norma [6] nabízí vzor protokolu o zkoušce, stejně jako údaje, jež by měly být v protokolu zaznamenány. Konečná podoba a obsah protokolu je však věcí instituce provádějící zkoušení.

Podle normy [6] má protokol obsahovat údaje o zkoušené součásti (materiál, rozměry, označení, stav povrchu, stádium výroby), o účelu zkoušky, o použitých zkušebních prostředcích (klasifikace systému, výrobce, označení, číslo šarže), zkušební instrukce a případné odchylky od nich, výsledky zkoušky (nalezené indikace a jejich specifikace) a údaje o místě, času, zkoušejícím a případně i doзору zkoušky.

4.7 Konečné čištění

Konečné čištění musí být provedeno vždy, hrozí-li omezení dalšího zpracování nebo provozních požadavků zkoušené součásti po provedení zkoušky, nebo je-li to nutné před dalším ošetřením povrchu součásti (nátěr, konzervace povrchu před korozi apod.).

Stejně tak je konečné čištění zařazeno před opakováním zkoušky např. z důvodu nejednoznačnosti provedené zkoušky. V takovém případě je nutno opakovat zkoušku celou. Konečné čištění se tak de facto stává prvním krokem nového zkoušení – předčištěním. Použití jiného typu penetrantu, nebo téhož penetrantu od jiného výrobce je v takovém případě povoleno jen po velmi důkladném odstranění veškerého zbytkového penetrantu z necelistvostí.

Odstranění zbytků penetrantu a vývojky z povrchu bývá prováděno podobně jako v případě předčištění – ostříkem vodou, otřením utěrkou navlhčenou ve vodě nebo rozpouštědle, očištění v parách rozpouštědla atd.

4.8 Zkoušení při abnormálních teplotách

Běžné teplotní rozmezí zkoušky je 10 °C až 50 °C, jak bylo uvedeno v kapitole 4.1. Nad i pod tímto rozmezím roste nebezpečí selhání zkoušky. Zkoušky ale mohou být prováděny i v jiném teplotním intervalu, povolí-li to výrobce zkušebních prostředků.

Při provádění zkoušek v abnormálních teplotních podmínkách je nutné respektovat pokyny a doporučení výrobce kapilárních prostředků. Citlivost všech metod zkoušení při abnormálních teplotách nicméně není taková jako při zkoušení v běžných teplotách.

S detekčními kapalinami pro nízké teploty lze provádět zkoušky až do cca -40 °C. Takové kapaliny nesmí výrazně měnit svou viskozitu s klesající teplotou, proto jsou většinou na bázi benzinových rozpouštědel.

Kapilární prostředky pro vysoké teploty jsou rozděleny do skupin podle teplotní použitelnosti (tři až pět skupin), s horní hranicí použitelnosti 260 °C. [2] Penetrant se nanáší většinou ve formě tuhé látky, která se na povrchu s vyšší teplotou roztaví a dále se chová jako běžný penetrant za běžných teplot. Existují ale i nehořlavé penetranty pro vysoké teploty k aplikaci nástřikem. Aplikace vývojek zůstává i při vysoké teplotě standardní. Používají se vývojky buď ve formě prášku (suchá vývojka), nebo v podobě suspenze s chlorovaným uhlovodíkem jako nosnou kapalinou. Ta musí být nehořlavá

a nesmí se v rozmezí teplot rozkládat. Používanou nosnou kapalinou je např. tetrachlormethan.

Zkoušením mimo běžný teplotní rozsah se zabývají normy ČSN EN ISO 3452-5 a ČSN EN ISO 3452-6.

5 Zařízení pro kapilární zkoušky

Text kapitoly vychází z [2].

Zkušební zařízení můžeme rozdělit na přenosná a stacionární. Přenosný systém je tvořen sadou kapilárních prostředků, nejčastěji v podobě sprejů, dále zahrnuje běžné pracovní pomůcky (pracovní lampa, lupa, čisticí pomůcky, ochranné pomůcky). Používá se pro zkoušení menšího počtu výrobků většinou na přechodných pracovištích. Přenosný systém se tak využívá při opravách a údržbě zařízení, při kontrole malých sérií, anebo v laboratořích.

Stacionární systém bývá označován jako zkušební linka nebo kapilární linka. Jak název napovídá, jde o stálé pracoviště. Kapilární linka se skládá ze soustavy nádrží obsahujících kapilární prostředky. Kapilární linka je rozdělena na jednotlivé úseky, vždy pro danou část zkoušky (příprava, aplikace penetrantu, mezičištění atd.) s přizpůsobením metodě zkoušky.

Kapilární linky se využívají zejména pro sériové zkoušení výrobků. Barevný systém převládá při zkoušení kovaných, tažených nebo lisovaných výrobků. Fluorescenční systém je používán pro zkoušení součástí pro letecký, železniční a automobilový průmysl.

Návrh velikosti kapilární linky vychází z požadavků na velikost nádrží pro kapilární prostředky a tedy z předpokládané velikosti zkoušených součástí, neboť zkoušená součást by neměla ležet až u dna nádrže z důvodu možného výskytu usazenin u dna nádrže. Zkoušené součásti bývají ponořeny do kapilárních lázní jednotlivě přímo, nebo hromadně v drátěných koších.

Kapilární linky mohou být podle obsluhy ruční (vše se provádí ručně, časy působení prostředků jsou hlídány pracovníkem), poloautomatické (mezi úseky se zkoušené součásti přemisťují na dopravníku), nebo zcela automatické (počítač hlídá časy penetrace a jiné, součásti se přemisťují na dopravníku).

Některé linky mohou být automatické i co do vyhodnocování indikací. Takový systém je navíc vybaven záznamovými kamerami a počítačem se softwarem, který dokáže indikace rozpoznat a porovnat jejich velikost s kritérii přípustnosti.

6 Vzhled indikací a citlivost kapilárních metod

Kapitola 6.1 čerpá informace z [2], [4], navazující kapitola 6.2 z [1], [7] a [8].

6.1 Vzhled indikací

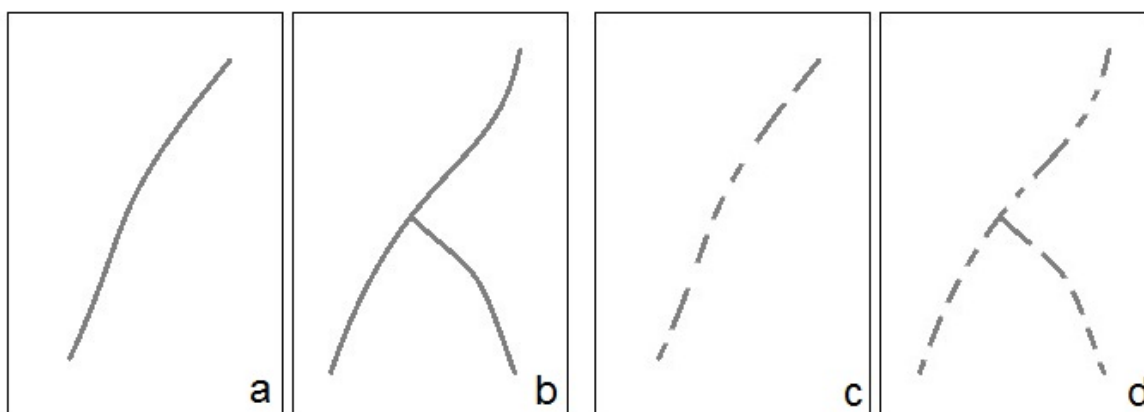
Indikace vznikají v místech, kde penetrant zateče do necelistvosti materiálu a odkud je později „vytáhnut“ a zviditelněn. Upustíme-li od rozdílného vzhledu indikací jakožto rozdílu v použité metodě (fluorescenční, barevné), můžeme indikace rozdělit podle vzhledu (a tím i částečně dle příčiny):

1) Souvislá liniová indikace

Za liniovou indikaci je považována taková souvislá nebo přerušovaná indikace, jejíž délka je větší než trojnásobek šířky indikace. Průběh liniových indikací je skoro rovný, nebo mírně zakřivený. Příkladem mohou být praskliny (rovný průběh) či trhliny vzniklé tepelným namáháním (zakřivený průběh sledující hranice materiálůvých zrn). V praxi lze nalézt tyto vady v odlitcích či swarech jako nespojená místa (studené spoje) nebo u válcovaných materiálů jako tzv. přeplátování.

2) Přerušovaná liniová indikace

Jde o liniové indikace – jejich průběh je přibližně rovný nebo mírně zakřivený. Indikace však nevychází na povrch v celé své délce jako u souvislé liniové indikace, nýbrž je přerušována. Tyto indikace vznikají např. u výkovků nebo vývalků, kdy působením tvářecích sil dochází k částečnému spojení vrstev materiálu.



Obr. 6.1 – Vzhled indikací [2]

a, b – souvislé liniové indikace; b, c – přerušované liniové indikace

3) Okrouhlá indikace

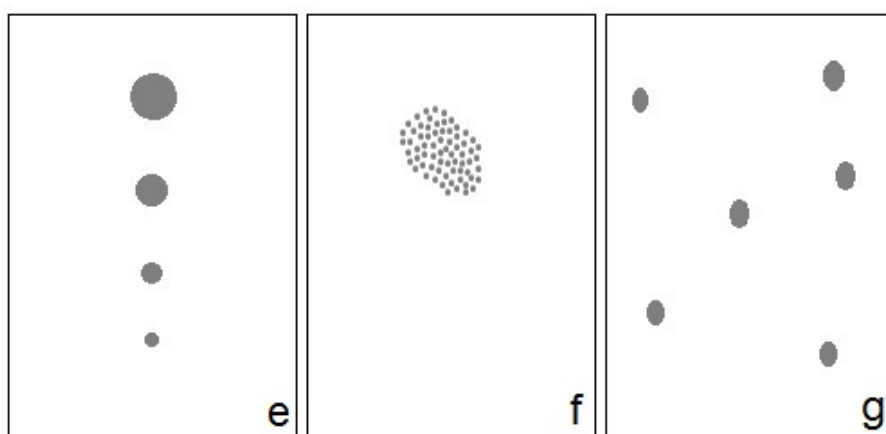
Okrouhlá indikace je taková indikace, jejíž délka je menší nebo rovna trojnásobku šířky. Obsah penetrantu v indikaci je v takovém případě velký, čímž vznikají velmi syté a rychle se rozpíjející indikace. V praxi nalézáme tuto indikaci zejména u odlitků (vměstky, plynové dutiny, bodliny) a svarů (kráterovité trhliny u konce svarové housenky).

4) Tečkovitá indikace

Jde o shluk různě velkých bodových indikací. Jsou způsobeny porezitou materiálu, jemnými ředinami, bodlinovitostí nebo např. v případě litého materiálu jeho hrubou strukturou.

5) Rozptýlená indikace (difúzní)

Často jde o oblasti se zvýšeným pozadím (barevným, fluoreskujícím), ale obecně jde o indikace bez ostrého ohraničení. Vyskytuje-li se tento typ vady i přes pečlivě provedené mezičištění, může signalizovat velmi jemnou porezitu či jemné mikrostaženiny materiálu. V takovém případě je vhodnější pro úplnou jistotu o kvalitě povrchu zkoušku zopakovat se zvýšenou důkladností při očištění povrchu, anebo povrch zkontrolovat další defektoskopickou metodou.



Obr. 6.2 – Vzhled indikací [2]

e – okrouhlé indikace; f – tečkovité indikace; g – rozptýlené indikace

Kromě pravých indikací mohou vznikat i tzv. nepravé (falešné) indikace. Jde o indikace neodhalující vadu materiálu, neboť vznikly chybou při zkušebním postupu. Mohou vznikat z důvodu nedokonale provedené fáze mezičištění či vinou znečištění penetrantem během zkoušení. Typickými příčinami je ulpívání vláken na povrchu, znečištění pracovního prostoru, vzájemný dotyk různých zkoušených součástí atd.

6.2 Citlivost kapilárních metod

V textu této bakalářské práce byl pojem citlivosti několikrát zmíněn. Stupeň citlivosti udává, jak malé necelistvosti dokáže kapilární prostředek, respektive kapilární soubor odhalit. Citlivost kapilárních metod a její zjišťování je rozsáhlejším tématem, pro jehož probrání jistě nestačí jedna kapitola. Proto je tato podkapitola věnována výsledkům, tzn. rozdělení na stupně citlivosti, nikoliv zjišťování citlivosti jako takové. Metody zjišťování a stanovování budou pouze stručně zmíněny.

Zjišťování citlivosti je věcí výrobce zkušebních prostředků, přičemž je třeba hodnotit každý zkušební prostředek samostatně a poté ještě zkušební systém jako celek.

Norma [7] specifikuje dva druhy kontrolních měrek. Kontrolní měrka typu 1 se používá pro určení stupňů citlivosti barevných a fluorescenčních prostředků kapilárních systémů. Kontrolní měrka typu 2 se používá pro pravidelné posouzení účinnosti souprav kapilárních prostředků.

Na základě použití kontrolní měrky typu 1 lze rozdělit fluorescenční systémy do pěti stupňů citlivosti, jak uvádí norma [8]:

- stupeň citlivosti $\frac{1}{2}$ (velmi nízký),
- stupeň citlivosti 1 (nízký),
- stupeň citlivosti 2 (střední),
- stupeň citlivosti 3 (vysoký),
- stupeň citlivosti 4 (velmi vysoký).

Stejně tak rozděluje norma [8] barevné systémy do dvou stupňů:

- stupeň citlivosti 1 (normální),
- stupeň citlivosti 2 (vysoký).

Rozdělení dvouúčelových penetrantů není normou [8] specifikováno, nicméně je možno použít dvoustupňový systém jako u barevných systémů.

Kromě určení citlivosti systémů lze určovat chování detekčních kapalin za daných podmínek pomocí tzv. kapilárních měrek. Při tom se používá kapilární měrka, zkoušená detekční kapalina a etalon v podobě detekční kapaliny se známými vlastnostmi. Další alternativou určení je ověřování vlastností bez použití měrek. Opět je použito srovnání s látkou se známými vlastnostmi. Do této skupiny zkoušek lze zařadit zkoušení meniskovým způsobem a určování křivek roztékavosti.

Používané kapilární měrky mohou mít umělou, nebo přirozenou necelistvost. Umělá necelistvost má přesné známé rozměry, čímž zaručuje opakovatelnost zkoušky. Zkoušení měrkou s umělou necelistvostí nicméně nelze přesně vztáhnout na zkoušení skutečných vad. Kapilární měrky s přirozenou necelistvostí mají značně omezenou životnost, ale zato popisují přesně chování kapilárních prostředků.

Mezi kapilární měrky s přirozenou necelistvostí se řadí hliníková měrka, chromovaná měrka a ohybová měrka.

Ke kapilárním měrkám s umělou necelistvostí patří US Navy Test Block, měrka IIW, měrka VÖEST a kuželová měrka.

Více informací o zkoušení citlivosti, kontrolních i kapilárních měrkách, o zkoušení meniskovým způsobem a o určování křivek roztékavosti lze nalézt v literatuře – v normách [7], [8], nebo knihách [1], [2] a [4].

7 Přehled norem vztahujících se ke kapilárnímu zkoušení

Pro potřeby této práce pouze uvedu normy, které se zkoušením kapilárními metodami zabývají, včetně roku jejich poslední aktualizace. Seznam převzat z [2] a aktualizován.

- **ČSN EN ISO 12706:2010** Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení kapilární metodou – Terminologie,
- **ČSN EN ISO 3059:2013** Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení kapilární a magnetickou práškovou metodou – Podmínky prohlížení,
- **ČSN EN ISO 3452-1:2015** Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady,
- **ČSN EN ISO 3452-2:2014** Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 2: Zkoušení kapilárních prostředků,
- **ČSN EN ISO 3452-3:2014** Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 3: Kontrolní měřky,
- **ČSN EN ISO 3452-4:1999** Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 4: Vybavení,
- **ČSN EN ISO 3452-5:2009** Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení kapilární metodou – Část 5: Zkoušení kapilární metodou při teplotách vyšších než 50 °C,
- **ČSN EN ISO 3452-6:2009** Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení kapilární metodou – Část 6: Zkoušení kapilární metodou při teplotách nižších než 10 °C,
- **ČSN EN ISO 23277:2016** Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení kapilární metodou – Stupně přípustnosti,
- **ČSN EN ISO 10893-4:2011** Nedestruktivní zkoušení ocelových trubek – Část 4: Zkoušení bezešvých a svařovaných ocelových trubek pro zjišťování povrchových necelistvostí kapilární metodou,
- **ČSN EN 1371-1:2012** Slévárenství – Zkoušení kapilární metodou – Část 1: Odlitky odlévané do pískových forem gravitačně a pod nízkým tlakem,
- **ČSN EN 1371-2:2017** Slévárenství – Kontrola kapilární metodou – Část 2: Přesně lité odlitky,
- **ČSN EN 10228-2:2017** Nedestruktivní zkoušení ocelových výkovků – Část 2: Kapilární zkouška,
- **ČSN ISO 9916:1994** Odlitky ze slitin hliníku a hořčíku – Kontrola kapilární metodou.

8 Aplikace teoretických znalostí v praxi

8.1 Stanovení cíle práce a navrhovaný postup řešení

Cílem této práce je otestovat vybrané součásti metodou kapilárního zkoušení, zda splňují požadavky norem příslušného výrobního sektoru, a vypracovat zkušební protokoly.

Zkoušení bylo prováděno na třech součástech zastupujících výrobní sektory wp, w a f, tzn. tvářené výrobky, svařované výrobky a výkovky. Zkoušené součásti byly vybrány náhodně ze souboru součástí pro nácvik praktické části certifikační zkoušky. Vybrané součásti typově odpovídají zkušebnímu součástí při certifikační zkoušce.

Zkoušení probíhalo v prostorách laboratoře firmy PTS Josef Solnař, s. r. o. a s použitím jejího vybavení.

Navrhovaný postup:

- provést testování pomocí přenosného kapilárního systému firmy Pfinder Chemie s metodou barevné indikace,
- zkoušet součásti simultánně, tzn. s vhodně zvoleným časovým rozestupem mezi jednotlivými fázemi zkoušení různých součástí, aby byl výsledný čas zkoušení minimální,
- po ukončení vyvíjecího času zaznamenat indikace nákresem i fotografií a provést vyhodnocení.

8.2 Postup zkoušení

Tento použitý zkušební postup je společný pro všechny tři zkoušené součásti. Případné odchylky jsou zapsány v části věnované zkoušení dané součásti (kapitoly 8.3 až 8.5).

Po vstupu do připravené laboratoře jsem zkontroloval zkušební vybavení a podmínky zkoušení:

- platné kalibrační známky na zkušebních měřidlech (neoznačená měřidla brána jako informativní),
- použitelnost zkušebních prostředků – doby expirace prostředků nebyly překročeny, obaly zkušebních prostředků nevykazovaly poškození,
- intenzita osvětlení na pracovním místě dostatečná – 650 lx v hlavní pracovní oblasti,

- teplota v laboratoři 22 °C, teplota zkoušených součástí vyrovnaná s teplotou okolí – odpovídá předpisu použití podle výrobce zkušebních prostředků. Teplota změřena informativně nástěnným teploměrem.

Převzal jsem součásti ke zkoušení a seznámil se s nimi. Zaznamenal jsem si označení součástí (včetně orientace) a jejich potřebné rozměry. Poté jsem se přesunul k pracovnímu místu, které jsem očistil vodní sprchou od případných pozůstatků penetrantu z dřívějších zkoušek.

Očištění součástí (zejména hrubé) bylo provedeno již před převzetím součástí, proto jsem zkoušený povrch a potřebné okolí pouze dočistil rozpouštědlem (čističem na bázi rozpouštědla) a papírovými utěrkami. Rozpouštědlo jsem nanášel přímo na zkoušený povrch nástřikem. Po otření povrchu do sucha a umožnění vypaření zbývajících rozpouštědla jsem přikročil k další fázi zkoušení.

Pro zkoušení jsem zvolil přenosný zkušební systém klasifikace II Ee 2 podle ČSN EN ISO 3452-1:2015, což znamená použití barevného kontrastního penetrantu (II) odstranitelného vodou a rozpouštědlem (E) spolu s bezvodou vývojkou na bázi rozpouštědla (e). Všechny použité kapilární prostředky byly ve formě spreje. Požadovaná citlivost zkoušek nebyla uvedena, odpovídá však citlivosti 2 (vysoká citlivost) podle ČSN EN ISO 3452-2:2014.

Na zkoušený povrch byl v rovnoměrné vrstvě nanesen červený emulgační penetrant Pfinder 860. Penetrační čas byl zvolen 10 minut a je roven času vyvíjení. Vrstva penetrantu na povrchu byla průběžně kontrolována, aby nedošlo k zasychání penetrantu.

Po uplynutí penetračního času jsem provedl mezičištění. Prvotní hrubé čištění pomocí vody a papírových utěrek, následné důkladnější čištění papírovými utěrkami a čističem Pfinder 895, který jsem nanesl na utěrku a jí pak povrch dočistil.

Ihned po dokončení mezičištění jsem pokračoval nanesením vývojkou. Použil jsem vývojku Pfinder 871. Čas vyvíjení byl zvolen, jak už jsem uvedl, rovný času penetračnímu, tj. 10 minut. Nedlouho po nanesení penetrantu jsem provedl první náhled na vyvíjecí proces a udělal první fotografii vznikajících indikací. Další náhledy (již nezaznamenávané) na vznikající indikace jsem prováděl po cca 4 minutách.

Jakmile uběhl čas vyvíjení, provedl jsem inspekci povrchu – zaznamenal jsem polohu a velikost indikací (měřeno metrem, respektive pravítkem a posuvným měřítkem) a současně jsem fotografií zaznamenal stav povrchu.

Po ukončení zkoušení jsem provedl závěrečné očištění součástí vodní sprchou a odevzdal součásti k provedení důkladného čištění (v ultrazvukové vaně).

Během celého procesu jsem dbal na dodržení zásad BOZP prací ve větraném prostoru spolu s použitím ochranných rukavic pro manipulaci s penetrantem.

Po dokončení zkoušky jsem vypracoval protokoly o provedených zkouškách. Formát mých protokolů vychází z podoby zkušebního protokolu firmy PTS Josef Solnař, s. r. o. Na rozdíl od vzorového protokolu podle normy [6] je mnou vytvořený formát protokolu značně zjednodušen uvedením pouze nezbytných údajů pro identifikaci zkoušky a zkoušené součásti. Vypracované protokoly jsou součástí příloh bakalářské práce.

8.3 Zkoušení přírubového ozubeného kola (výrobkový sektor wp)

Při zkoušení této součásti jsem postupoval zcela podle postupu v kapitole 8.2. Rozsah zkoušení (100 % povrchu příruby ze strany bez ozubení) a třída jakosti (3) mi byly zadány pracovníkem laboratoře. Vyhodnocení jsem provedl podle normy ČSN EN 10228-2:2017 zabývající se výkovky. Vzhledem k velikosti součásti nebyl brán zřetel na požadavek normy omezit rozsah zkoušky jen na referenční plochu (formát A6: 148 x 105 mm).

O přípustnosti indikace rozhoduje její velikost při srovnání s tabulkou 8.1 podle normy [9].

Tab. 8.1 – Třídy jakosti, úroveň pro registraci a kritéria přípustnosti [9]

Parametr	Třída jakosti			
	1	2	3	4 ^a
Úroveň pro registraci, (mm) ^b	≥ 7	≥ 3	≥ 3	≥ 1
Přípustná délka L jednotlivých indikací, popřípadě největší přípustná délka L_g souvislých indikací, (mm) ^b	≤ 20	≤ 8	≤ 4	≤ 2
Přípustná celková délka lineárních indikací na referenční ploše, (mm) ^b	≤ 75	≤ 36	≤ 24	≤ 5
Přípustné rozměry jednotlivých okrouhlých indikací, (mm) ^b	≤ 30	≤ 12	≤ 8	≤ 3
Největší přípustný počet registrovaných indikací na referenční ploše ^c	15	10	7	5

^a Třída jakosti se nepoužívá pro zkoušení ploch s přídavkem na opracování ≥ 0,5 mm povrchu.
^b Hodnoty uvedené v tabulce platí pro velikost indikací, nikoliv pro skutečné vady na povrchu.
^c Referenční plocha: 148 mm x 105 mm (tj. formát A6). Pro objekty menší než referenční plocha nebo, když plocha je zkoušená menší než referenční plocha, pak maximálně přípustné množství indikací by mělo být určeno a dohodnuto podle toho (kritéria přípustnosti rozměrů zůstanou nezměněna).

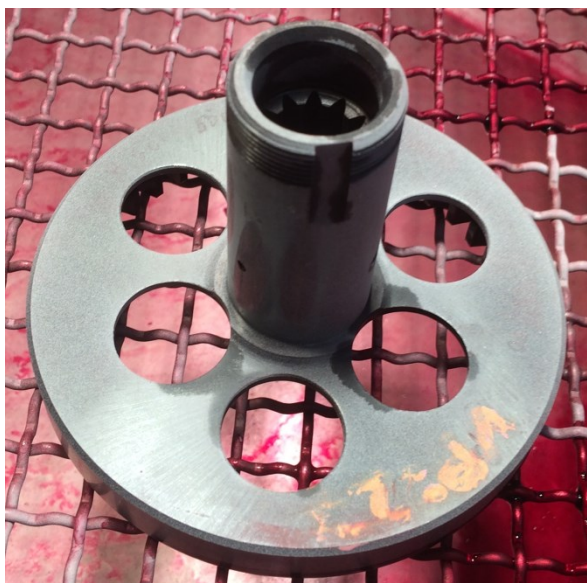
Nebudu-li uvažovat velmi jemné pozadí (např. v oblasti označení součásti), tak na zkoušeném povrchu jsem našel jedinou nevelkou indikaci. Tuto indikaci jsem vyhodnotil podle normy jako přípustnou okrouhlou indikaci, neboť její rozměr (1 mm) je menší než úroveň pro registraci pro danou třídu jakosti. Nemusela by tak být ani registrována. Pro více informací o nalezené indikaci viz protokol o zkoušce v přílohách (příloha A).



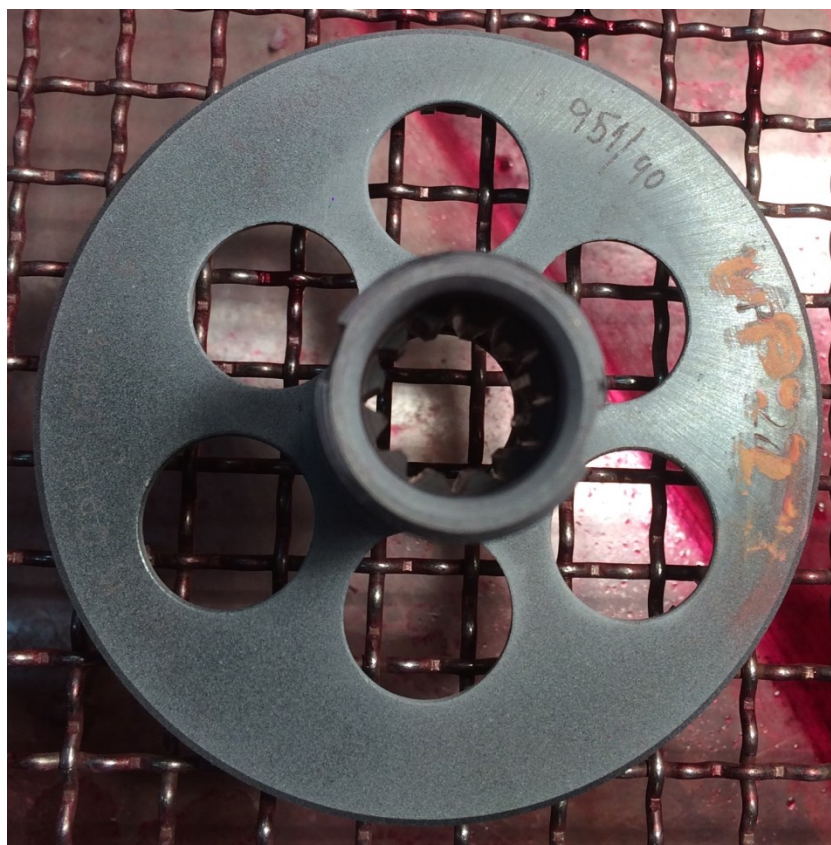
Obr. 8.1 – Zkoušené přírubové ozubené kolo [autor]



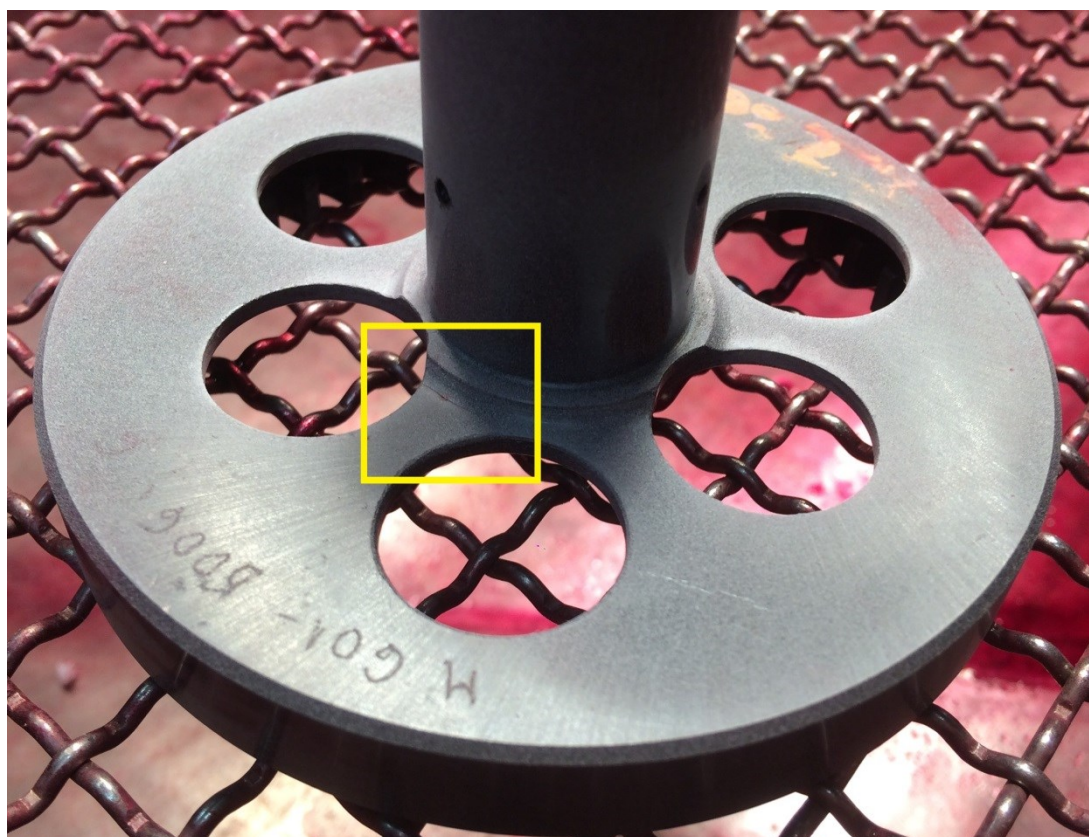
Obr. 8.2 – Přírubové ozubené kolo po nanesení penetrantu [autor]



Obr. 8.3 – Přírubové ozubené kolo po zahájení vyvíjení [autor]



Obr. 8.4 – Přírubové ozubené kolo po skončení vyvíjecího času [autor]



Obr. 8.5 – Přírubové ozubené kolo – detail [autor]

8.4 Zkoušení koutového svaru (výrobní sektor w)

Provedl jsem zkoušení podle postupu v kapitole 8.2 s tím rozdílem, že zhruba v polovině penetračního času jsem doplnil penetrant na zkoušený povrch. Tento fakt nemá vliv na provedení či výsledky zkoušky.

Při vyhodnocování indikací jsem se řídil normou ČSN EN ISO 23277:2016, která se věnuje zkoušení svarů. Tato norma také předepisuje rozsah zkoušení – veškerý svarový kov a základní kov po stranách do vzdálenosti 10 mm. Vyhodnocení jsem provedl podle instrukce pracovníka laboratoře pro stupeň přípustnosti 2.

Rozhodujícím kritériem o přípustnosti indikace je její velikost podle tabulky 8.2 vycházející z normy [10].

Tab. 8.2 – Stupně přípustnosti pro indikace [10]

Rozměry v milimetrech

Typ indikace	Stupeň přípustnosti ^a		
	1	2	3
Lineární indikace l = délka indikace	$l \leq 2$	$l \leq 4$	$l \leq 8$
Nelineární indikace d = rozměr hlavní osy	$d \leq 4$	$d \leq 6$	$d \leq 8$

^a Stupně přípustnosti 2 a 3 mohou být uváděny se znakem „X“ což znamená, že všechny zjištěné lineární indikace musí být hodnoceny podle stupně 1. Avšak pravděpodobnost detekce menších indikací, než jsou uvedené v tabulce pro původní stupně přípustnosti, může být nízká.

Nalezl jsem celkem čtyři indikace, které splnily podmínku registrace, a tím i svou nepřípustnost. Nalezené indikace byly lineární a seskupené lineární, přičemž rozměr největší z nich byl 28 mm. Přípustné indikace jsem do protokolu v souladu s normou nezaznamenával. Další informace o nalezených indikacích poskytuje protokol o zkoušce umístěný v přílohách (příloha B).



Obr. 8.6 – Zkoušený koutový svar [autor]



Obr. 8.7 – Svar po nanesení penetrantu [autor]



Obr. 8.8 – Svar po zahájení vyvíjení [autor]



Obr. 8.9 – Svar po skončení vyvíjecího času [autor]

8.5 Zkoušení výřezu čepu (výrobkový sektor f)

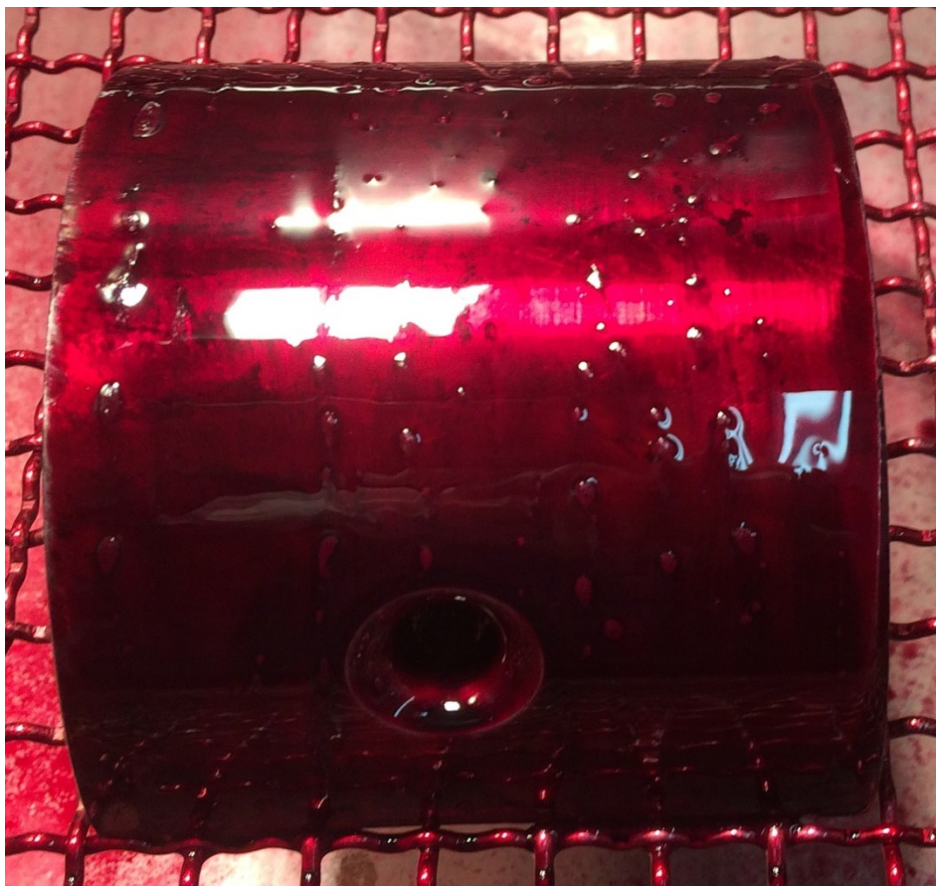
Výřez čepu jsem zkoušel tak, jak jsem popsal v kapitole 8.2, ovšem s výjimkou zvětšení vrstvy penetrantu po cca třetině penetračního času.

Rozsah zkoušení (100 % vnějšího povrchu) i třída jakosti (3) byly zadány pracovníkem zkušební laboratoře. Při vyhodnocování jsem opět využil normu ČSN EN 10228-2:2017, stejně jako v kapitole 8.3. Vzhledem k velikosti součásti nebylo třeba upravit rozsah zkoušení uvažováním referenční plochy. Kritéria přípustnosti podle normy [9], viz tabulka 8.1 na straně 42.

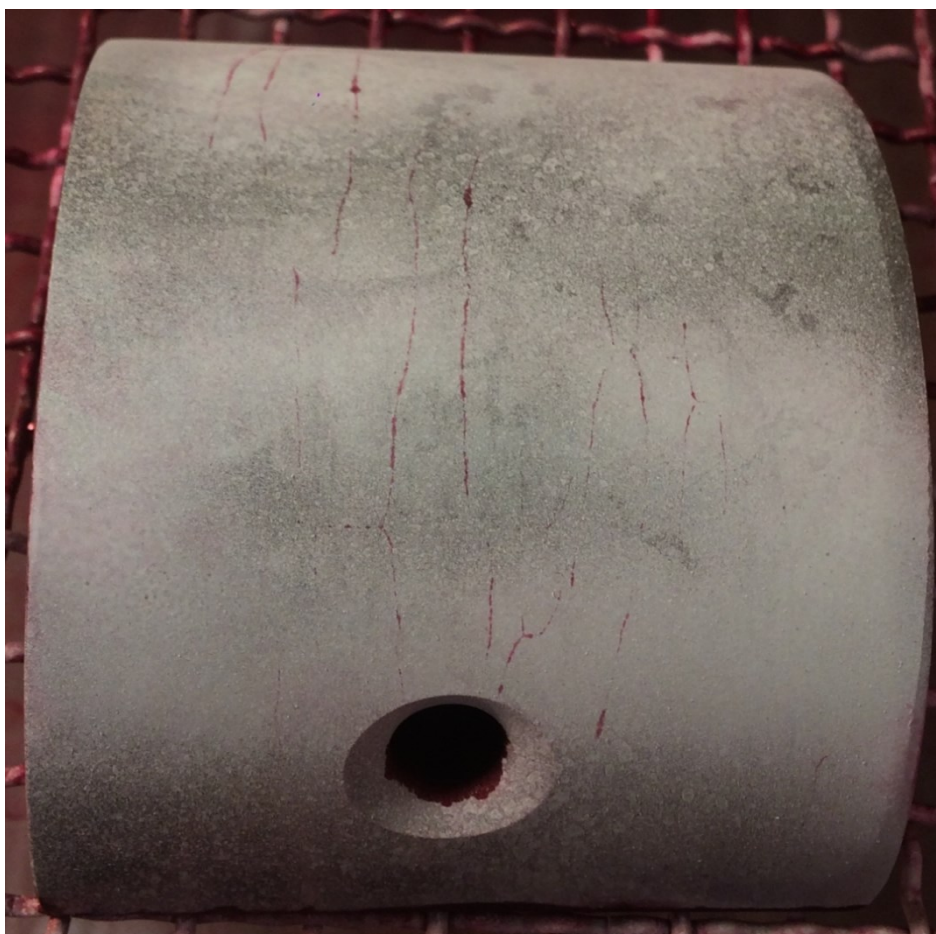
Na povrchu jsem našel shluk lineárních indikací, z nichž mnohé by zapříčinily svými rozměry nepřípustnost součásti i jen samostatně. Rozměr nejdelší z indikací byl 73 mm. Počet nalezených indikací (11) převýšil normou stanovený maximální počet indikací (3) na zkoušené ploše. Veškeré nalezené nevyhovující indikace včetně souvisejících informací jsem uvedl do protokolu o zkoušce (příloha C), který je v části příloh.



Obr. 8.10 – Zkoušený výřez čepu [autor]



Obr. 8.11 – Výřez čepu po nanesení penetrantu [autor]



Obr. 8.12 – Výřez čepu po zahájení vyvíjení [autor]



Obr. 8.13 – Výřez čepu po skončení vyvíjecího času [autor]

8.6 Vyhodnocení provedených zkoušek

Vzhledem k indikacím nalezeným na součástech lze říci, že dvě ze tří zkoušených součástí nevyhovují podmínkám svých výrobních norem.

Za nevyhovující je třeba považovat zkoušený koutový svar a výřez čepu. Toto tvrzení nemohou ovlivnit ani drobné chyby provedené v průběhu zkoušení, neboť na každé ze součástí bylo nalezeno více nevyhovujících indikací, jejichž poloha je zakreslena ve zkušebních protokolech.

Zkouška přírubového ozubeného kola však mohla být nepříznivě ovlivněna, zřejmě během mezičištění. K tomuto tvrzení mě vede fakt, že při důkladnějším pohledu na nalezenou indikaci jsem shledal, že leží na vrypu či prasklině (není možno určit). Je zde tedy nejistota, zda nemohlo dojít k vymytí penetrantu z necelistvosti, což by mohlo vysvětlit, proč okolí indikace zanechalo slabou nebarevnou stopu na vývoje.

Tento fakt znamená, že zkouška nemusí zcela odpovídat skutečnému stavu součásti a já sám jako zkoušející bych považoval za vhodné opakovat zkoušku například pomocí jiné metody (např. magnetické práškové). Bohužel po dokončení současně probíhajících zkoušek nebylo možné z časových důvodů provést zopakování zkoušky stejnou metodou.

Na obrázcích v kapitolách 8.4 a 8.5 lze pozorovat chyby provedené při zkoušení koutového svaru a výřezu čepu. Jak jsem ale již uvedl, tyto provedené chyby nemohou změnit výsledek zkoušky:

- nedostatečné vysušení necelistvosti před nanesením vývojky (obr. 8.8 a 8.9),

Tato chyba by neměla působit potíže, neboť necelistvost byla odhalena ve svém dalším průběhu; navíc vlhkost také zanechala stopu na vývojce. Na součásti ale byly nalezeny další nevyhovující indikace, proto nepřesnost zkoušky způsobená touto chybou nerozhoduje o (ne)vyhovujícím stavu součásti.

- znečištění vývojky vodou (8.13),

K potřísnění povrchu vývojky zjevně došlo ve fázi vyvíjení během vyvíjecího času. Vzhledem k tomu, že na záznamu po zahájení vyvíjení ani během něj nebyl v místě pozorován vznik indikace, nelze říct, že by tato chyba znehodnotila zkoušku.

- nepravé indikace (obr. 8.12 a 8.13),

Vznikly v místě nedostatečného odstranění penetrantu ze součásti (otvor) a také vinou nedopatření znečištěného pracovního místa. Na součásti nicméně byla pozorována řada nevyhovujících lineárních indikací, proto nehrozí nesprávné vyhodnocení stavu součásti vinou překrytí rozhodující indikace.

9 Závěr

V této bakalářské práci jsem shrnul dostupné informace o kapilárních metodách nedestruktivního zkoušení a informace s nimi související. Získané vědomosti jsem následně využil k provedení zkoušek kapilární metodou.

V praktické části práce jsem zvolil postup zkoušky pro tři různé součásti. S ohledem na vybavení zkušební laboratoře se jevila nejvhodnější metoda zkoušení s barevnou indikací s vysokou přesností, s využitím emulgačního penetrantu na olejové bázi, čističe na bázi alkoholu a rozpouštědlové vývojky.

Zvolený postup zkoušení jsem aplikoval na vybrané součásti a nalezené indikace jsem vyhodnotil podle příslušných výrobních norem a instrukcí pracovníka laboratoře. Následně jsem vypracoval zkušební protokoly, které jsou uvedeny v příloze.

Vyhodnocením indikací jsem dospěl k závěru, že dvě ze tří zkoušených součástí nesplňují podmínky na ně kladené. U jedné (vyhovující) součásti mohlo ale dojít ke zvýšení nepřesnosti zkoušky mou nezkušeností při provádění zkoušek, nicméně výsledky zkoušek dvou dalších součástí (nevyhovujících) nelze nepovažovat za zcela jednoznačné.

Zkoušená část přírubového ozubeného kola vykazala přípustnou okrouhlou indikaci – součást vyhovuje. Na zkoušeném povrchu součásti s koutovým svarem byly nalezeny lineární a seskupené lineární indikace převyšující meze přípustnosti – součást nevyhovuje. Na vnějším povrchu výřezu čepu byly indikovány četné nepřípustné lineární indikace – součást nevyhovuje. Podrobnosti o nalezených indikacích (poloha, rozměr a náčrt) jsou uvedeny ve zkušebních protokolech, které jsou umístěny v příloze.

Použitá literatura

- [1] KOPEC, Bernard a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [2] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálu: Učební texty zkoušení kapilární metodou pro všechny stupně kvalifikace*. 3. vydání. Ostrava: PTS Josef Solnař, 2013.
- [3] BARTUŠKA, Karel a Emanuel SVOBODA. *Fyzika pro gymnázia: Molekulová fyzika a termika*. 4. vydání. Praha: Prometheus, 2008. ISBN 978-80-7196-200-7.
- [4] VĚCHET, Mojmír, Jaroslav KESL, Lumír ŠPIKA a Vladimír EDER. *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-030-0100-5.
- [5] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. *Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [6] ČSN EN ISO 3452-1. *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [7] ČSN EN ISO 3452-2. *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení kapilární metodou – Část 2: Zkoušení kapilárních prostředků*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [8] ČSN EN ISO 3452-3. *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 3: Kontrolní měřky*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [9] ČSN EN 10228-2. *Nedestruktivní zkoušení ocelových výkovků – Část 2: Kapilární zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [10] ČSN EN ISO 23277. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení kapilární metodou – Stupně přípustnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

Seznam ilustrací a tabulek

Obr. 1.1 – Vzájemné působení molekul ve sféře molekulového působení [3]	12 -
Obr. 1.2 – Smáčení pevné látky (s) kapalinou (l) v plynném prostředí (g) [1]	13 -
Obr. 1.3 – Možnosti smáčení v kapiláře [2]	13 -
Obr. 1.4 – Konkávní (vlevo) a konvexní (vpravo) zakřivení hladiny [autor]	14 -
Obr. 3.1 – Působení emulgátoru [autor]	21 -
Obr. 4.1 – Povrch před čištěním [2]	26 -
Obr. 6.1 – Vzhled indikací [2]	35 -
Obr. 6.2 – Vzhled indikací [2]	36 -
Obr. 8.1 – Zkoušené přírubové ozubené kolo [autor]	42 -
Obr. 8.2 – Přírubové ozubené kolo po nanesení penetrantu [autor]	42 -
Obr. 8.3 – Přírubové ozubené kolo po zahájení vyvíjení [autor]	42 -
Obr. 8.4 – Přírubové ozubené kolo po skončení vyvíjecího času [autor]	43 -
Obr. 8.5 – Přírubové ozubené kolo – detail [autor]	43 -
Obr. 8.6 – Zkoušený koutový svar [autor]	45 -
Obr. 8.7 – Svar po nanesení penetrantu [autor]	45 -
Obr. 8.8 – Svar po zahájení vyvíjení [autor]	46 -
Obr. 8.9 – Svar po skončení vyvíjecího času [autor]	46 -
Obr. 8.10 – Zkoušený výřez čepu [autor]	47 -
Obr. 8.11 – Výřez čepu po nanesení penetrantu [autor]	48 -
Obr. 8.12 – Výřez čepu po zahájení vyvíjení [autor]	48 -
Obr. 8.13 – Výřez čepu po skončení vyvíjecího času [autor]	49 -
Tab. 1.1 – Hodnoty kinematické viskozity různých penetračních prostředků [4]	16 -
Tab. 3.1 – Klasifikace zkušebních prostředků [6]	24 -
Tab. 4.1 – Schéma normálního nebo emulgačního postupu [2]	25 -
Tab. 4.2 – Schéma postemulgačního postupu [2]	26 -
Tab. 8.1 – Třídy jakosti, úroveň pro registraci a kritéria přípustnosti [9]	41 -
Tab. 8.2 – Stupně přípustnosti pro indikace [10]	44 -

Seznam příloh

Příloha A – Zkušební protokol (výrobní sektor wp)

Příloha B – Zkušební protokol (výrobní sektor w)

Příloha C – Zkušební protokol (výrobní sektor f)

Příloha D – Potvrzení o absolvování kurzu

Příloha E – Fotografie pracovního místa ve zkušební laboratoři v prostorách firmy PTS
Josef Solnař, s. r. o., na němž bylo prováděno zkoušení součástí [autor]